

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

# Лесной журнал

**Научный рецензируемый журнал**

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

1

2023

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

## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

## **ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:**

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

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

# Lesnoy Zhurnal

## (Russian Forestry Journal)

**Scientific peer-reviewed journal**

Established in 1833

Issued as part of the

“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958

Published bi-monthly

1

2023

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

## **EDITORIAL BOARD:**

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

## **MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:**

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





## СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- А.В. Данчева, С.В. Залесов.* Формирование рубками ухода биологически устойчивых сосняков защитного назначения в Северном Казахстане.. 9
- Е.Н. Наквасина, Н.А. Прожерина.* Оценка отклика на изменение климата в опытах с происхождениями *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) на севере Русской равнины..... 22
- В.М. Лебедев, Е.В. Лебедев, В.Н. Сорокопудов, М.В. Ларионов.* Корневое питание, фотосинтез и чистая первичная продукция у древостоев рода *Picea* на уровне организма в пределах российского ареала..... 38
- И.Д. Самсонова.* Ресурсный потенциал медоносных растений степного Придонья..... 51
- Д.А. Данилов, А.А. Яковлев, С.А. Суворов, И.А. Крылов, С.А. Корчагов, Р.С. Хамитов.* Формирование надземной фитомассы лиственных древесных пород на постагрогенных землях..... 65
- Н.В. Примаков.* Состояние защитных лесных насаждений Азовского побережья Краснодарского края..... 77
- М.В. Ермакова, С.К. Стеценко, Е.М. Андреева.* Влияние высокоактивных соединений на механические свойства древесины двухлетних сеянцев сосны обыкновенной в лесных питомниках..... 88
- Д.Ю. Сирман.* Всхожесть семян хвойных интродуцентов в условиях Центрального Казахстана при различной стратификации и внесении в субстрат хвойного опада..... 100

## ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- А.Н. Заикин, В.В. Сиваков, Е.В. Шевелева.* Совершенствование конструкции цепных пильных аппаратов..... 116
- В.А. Уткин, С.А. Матвеев.* Особенности проектирования деревянных мостов автомобильных лесовозных дорог..... 126

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- А.П. Мохирев, К.П. Рукомойников, М.М. Герасимова, С.О. Медведев, М.А. Зырянов.* Технологический алгоритм производства продукции из порубочных остатков..... 153

*В.К. Любов, И.И. Цыпнятов.* Повышение эффективности энергетического использования биотоплива..... 172

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

*В.П. Сиваков, А.В. Вураско, А.Л. Шерстобитов.* Снижение колебаний массы бумаги в бумагоделательной машине..... 186

*А.В. Бахтиярова, С.Д. Пименов, А.И. Сизов.* Гидролиз гемицеллюлоз древесины при ультранизких концентрациях серной кислоты..... 201

---



## CONTENTS

## FORESTRY

- A.V. Dancheva, S.V. Zalesov.* Formation of Biologically Stable Protective Pine Forests by Improvement Thinning in Northern Kazakhstan..... 9
- E.N. Nakvasina, N.A. Prozherina.* Assessment of Response to Climate Change in Experiments with the Origins of *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) in the North Russian Plain..... 22
- V.M. Lebedev, E.V. Lebedev, V.N. Sorokopudov, M.V. Larionov.* Root Nutrition, Photosynthesis, and Net Primary Production in Tree Stands of the Genus *Picea* at the Organism Level Within the Range in Russia..... 38
- I.D. Samsonova.* Resource Potential of Melliferous Plants of the Steppe Don Region..... 51
- D.A. Danilov, A.A. Yakovlev, S.A. Suvorov, I.A. Krylov, S.A. Korchagov, R.S. Khamitov.* Formation of Aboveground Phytomass of Deciduous Tree Species on Post-Agrogenic Lands..... 65
- N.V. Primakov.* The State of Protective Forest Plantations on the Azov Coast of Krasnodar Krai..... 77
- M.V. Ermakova, S.K. Stetsenko, E.M. Andreeva.* Influence of Highly Active Compounds on Mechanical Properties of Wood of Two-Year-Old Scots Pine Seedlings in Forest Nurseries..... 88
- D.Yu. Sirman.* Seed Germination of Coniferous Introduced Species in the Environment of Central Kazakhstan with Various Stratification and Inclusion of Needle Litter into Substrate..... 100

## LOGGING TECHNOLOGIES

- A.N. Zaikin, V.V. Sivakov, E.V. Sheveleva.* Design Improvement of the Forestry Chain Saws..... 116
- V.A. Utkin, S.A. Matveev.* Features of Designing Wooden Bridges of the Forest Complex..... 126

## MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- A.P. Mokhirev, K.P. Rukomojnikov, M.M. Gerasimova, S.O. Medvedev, M.A. Zyrjanov.* Technological Procedure for the Manufacture of Products Using Felling Residues..... 153

*V.K. Lyubov, I.I. Tsygnyatov.* Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels 172

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

*V.P. Sivakov, A.V. Vurasko, A.L. Sherstobitov.* Reduction of Paper Pulp Fluctuations in Tissue Paper Making Machine..... 186

*A.V. Bakhtiyarova, S.D. Pimenov, A.I. Sizov.* Hydrolysis of Wood Hemicelluloses at Ultra-Low Sulfuric Acid Concentrations..... 201

---



Научная статья

УДК 630\*228.8:630\*24:630\*5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-9-21

## Формирование рубками ухода биологически устойчивых сосняков защитного назначения в Северном Казахстане

*А.В. Данчева<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [AAG-7263-2019](https://orcid.org/0000-0002-5230-7288)*

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

*С.В. Залесов<sup>2</sup>, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X)*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>*

<sup>1</sup>Государственный аграрный университет Северного Зауралья, ул. Республики, д. 7, г. Тюмень, Россия, 425003; a.dancheva@mail.ru

<sup>2</sup>Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; zalesovsv@m.usfeu.ru

Поступила в редакцию 24.02.21 / Одобрена после рецензирования 20.05.21 / Принята к печати 23.05.21

**Аннотация.** Проанализированы последствия проведения рубок ухода на постоянной пробной площади. Объектом ухода служили естественные чистые одновозрастные сосняки сухих аридных условий произрастания Казахского мелкосопочника (на примере Государственного национального природного парка «Бурабай»). Первый прием рубок проведен в 1994 г. под руководством А.А. Вейсмана в 25–30-летних насаждениях, интенсивность – от 12,5 до 49,7 %. Кроме рабочих секций заложенная в ходе исследований пробная площадь имела контрольные секции, где рубки ухода не осуществлялись. Через 70 лет после начала эксперимента во всех контрольных и рабочих секциях были установлены таксационные показатели древостоев и проанализированы последствия рубок ухода. Экспериментально доказано, что в сухих сосняках Северного Казахстана запас древостоев в рабочих секциях даже через 70 лет после проведения ухода не достигает объемов запаса в контроле. Указанное относится и к секциям, пройденным рубкой слабой интенсивности. В то же время рубки снижают запас почвенных горючих материалов и сухостоя, увеличивают средний диаметр деревьев пропорционально интенсивности изреживания. Это способствует повышению пожароустойчивости и рекреационной привлекательности насаждений. Отмечена растянутость ряда распределения деревьев по естественным ступеням толщины во всех секциях: количество естественных ступеней толщины в 1,8 раза больше по сравнению с нормативным распределением, что является одним из доказательств специфичности строения исследуемых сосняков. Наиболее перспективно применение рубок ухода сильной интенсивности по запасу. В процессе рубок из древостоя изымаются сухостойные, больные и отставшие в росте деревья. Рубки рекомендуются в 2 приема в возрасте 20–25 и 40–50 лет.

**Ключевые слова:** сосновые древостои, рубки ухода, интенсивность изреживания, таксационные показатели, Северный Казахстан, Казахский мелкосопочник, сосновые древостои Казахского мелкосопочника

*Для цитирования:* Данчева А.В., Залесов С.В. Формирование рубками ухода биологически устойчивых сосняков защитного назначения в Северном Казахстане // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 9–21. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-9-21>

Original article

## Formation of Biologically Stable Protective Pine Forests by Improvement Thinning in Northern Kazakhstan

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

*Sergey V. Zalesov*<sup>2</sup>, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

<sup>1</sup>Northern Trans-Ural State Agricultural University, ul. Respubliki, 7, Tyumen, 425003, Russian Federation; [a.dancheva@mail.ru](mailto:a.dancheva@mail.ru)

<sup>2</sup>Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; [zalesovsv@m.usfeu.ru](mailto:zalesovsv@m.usfeu.ru)

Received on February 24, 2021 / Approved after reviewing on May 20, 2021 / Accepted on May 23, 2021

**Abstract.** The article deals with the effect of thinning in a permanent trial plot (PTP). The objects of care were natural clean even-aged pine forests growing in arid conditions of the Kazakh Uplands (case study of the Burabay National Park). The first thinning led by A.A. Weisman was carried out in 1994 in 25–30-year-old stands with the care intensity from 12.5 to 49.7 %. Besides the operating sections, the trial plot laid out during the research had control sections, where thinning was not carried out. The inventory indicators of the stands were determined, and the effects of thinning were analyzed in all the control and operating sections 70 years after the experiment began. The experiment proves that in dry pine forests of Northern Kazakhstan, the stock of stands in the operating sections, even 70 years after the care does not reach the volume of stock in the control sections. This also applies to the sections covered by low-intensity thinning. At the same time, thinning reduces the stock of ground flammable materials and deadwood. It increases the average diameter of trees relative to the care intensity. This enhances the fire resistance and recreational attractiveness of the plantations. An expanded distribution series of trees by natural diameter classes is observed in all sections: the number of natural diameter classes is 1.8 times greater than the normative distribution, which is one of the proofs of the specificity of the structure of the studied pine forests. The use of thinning with high intensity by the stock is the most promising. Dead standing, diseased and stunted trees are removed from the stand in the course of thinning. Thinning is recommended for 20–25 and 40–50 years old trees.

**Keywords:** pine stands, improvement thinning, care intensity, inventory indicators, Northern Kazakhstan, Kazakh Uplands, pine stands of Kazakh Uplands

**For citation:** Dancheva A.V., Zalesov S.V. Formation of Biologically Stable Protective Pine Forests by Improvement Thinning in Northern Kazakhstan. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 9–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-9-21>

### Введение

Глобальное изменение климата, наблюдающееся в последние десятилетия, обуславливает повышенное внимание к эффективности лесоводственных мероприятий. Особого внимания заслуживают мероприятия по уходу за лесом, в част-



ности рубки ухода. Такие рубки обеспечивают [1–3, 17, 18, 21] выращивание устойчивых насаждений, отвечающих целевым задачам. Многолетняя практика показала высокую эффективность рубок ухода в различных регионах как на территории Республики Казахстан, так и за ее пределами. С помощью рубок ухода предотвращается нежелательная смена пород [6, 16, 20], формируются древостои нужного строения [5, 14] с требуемыми ландшафтно-эстетическими характеристиками [12, 13] и высоким качеством выращиваемой древесины [4, 8, 19].

История изучения последствий рубок ухода насчитывает многие десятки и даже сотни лет. Однако ряд вопросов об их эффективности остается нерешенным. Последнее объясняется биологическими особенностями древесных пород, спецификой лесорастительных условий в конкретном регионе, а главное, коротким сроком наблюдений за изучаемыми объектами [7, 9, 11, 16]. Оптимизация рубок ухода может быть обеспечена лишь на основе региональных нормативных документов, базирующихся на результатах комплексных исследований длительного периода при неоднократных обмерах деревьев на пробных площадях с установлением таксационных показателей.

Особенно важно выполнить подобные исследования в защитных лесах, в частности рекреационных. Рубки ухода здесь помимо устойчивости против негативного воздействия природных факторов формируют рекреационно привлекательные ландшафты, создают благоприятные условия для отдыхающих и способствуют повышению рекреационной емкости насаждения [10, 13].

Цель – анализ последствий рубок ухода через 70 лет после первого приема в сосняках Казахского мелкосопочника с формулировкой предложений по повышению эффективности таких рубок.

#### *Объекты и методы исследования*

Исследования проводились в чистых одновозрастных сосняках естественного происхождения группы типов леса  $C_2$  (сухой сосняк) на территории государственного национального природного парка (ГНПП) «Бурабай» в центральной части Казахского мелкосопочника.

Указанные сосняки произрастают в жестких аридных лесорастительных условиях. Почвенный покров представляет собой слабокаменистую дресвянистую супесь и относится к подтипу подзолистых почв. Основной фон живого напочвенного покрова составляют кустистые лишайники рода *Cladonia*, проективное покрытие которых – 60–70 %. Из травянистых растений в живом напочвенном покрове присутствуют типичные ксерофиты *Antennaria dioica* (L.) Gaerth., *Sedum acre* L. и *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth с общим проективным покрытием 5–7 %.

Рассматриваемые сосновые насаждения характеризуются высокими рекреационными нагрузками, что в сочетании с недостатком осадков, сильными ветрами и легковоспламеняющейся лесной подстилкой обуславливает высокую потенциальную пожарную опасность. Поэтому при проведении лесоводственных мероприятий важное значение имеет повышение пожароустойчивости насаждений.

Исследования проведены на постоянных пробных площадях (ППП), заложенных в 1949 г. А.А. Вейсманом, и позднее, с 1960 по 2000 гг., продолжены под руководством А.А. Макаренко. Нами в 2019 г. восстановлена 21 секция

(по 0,25 га каждая), 4 из которых контрольные и 17 рабочие, пройденные рубками ухода. Во всех секциях были выполнены таксационные работы в соответствии с ОСТ 56-69-83 и методикой [15].

В рабочих секциях, в 25–30-летних чистых одновозрастных сосняках, сформировавшихся на гари, по низовому методу равномерным способом были проведены рубки ухода с целью снижения густоты, увеличения площади роста оставляемых на доращивание деревьев и пожароустойчивости. Интенсивность рубки варьировала от слабой – меньше 15 % – до очень сильной – 35 % и более по запасу [10]. При этом 5 проанализированных секций характеризовались очень сильной, 4 – сильной, 5 – умеренной, 3 – слабой интенсивностью изреживания. При обработке материала для каждой интенсивности изреживания были установлены средние таксационные показатели.

После закладки эксперимента в период с 1960 по 1991 г. в рабочих секциях 4-кратно через каждые 10 лет проводилась уборка сухостоя, ветровала и сильно отставших в росте отмирающих деревьев потенциального отпада. Все погибшие деревья распределялись на свежий ветровал, сухостой и валежник. Принципиальным отличием свежего ветровала от валежника являлось то, что первый не был «отработан» вредителями, а второй уже не представлял опасности с точки зрения увеличения численности вторичных вредителей, поскольку был отработан или находился на одной из стадий деструкции. Данные о свежем ветвале и валежнике характеризуют наличие напочвенных горючих материалов, интенсивность возможных пожаров и рекреационную привлекательность насаждений.

В процессе анализа все собранные материалы обработаны статистическими методами.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Выполненные исследования показали, что через 70 лет после первого приема рубок ухода сосновые древостои в разных секциях характеризуются различными таксационными показателями (табл. 1).

Данные, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о значительной загущенности исследуемых сосновых древостоев. Так, в контрольных секциях густота 95–100-летних сосновых древостоев варьирует от 3692 до 5582 шт./га. Густотой объясняются наличие значительной конкуренции между деревьями и высокая доля сухостоя. Количество последнего изменяется в границах контрольных секций от 753 до 1291 шт./га, что составляет 16,9–23,1 % от общей густоты древостоев.

Рубки ухода значительно сократили запас сухостоя, а следовательно, способствовали снижению пожарной опасности и повышению пожароустойчивости древостоев. Если в контрольных секциях запас сухостойных деревьев был от 11 до 23 м<sup>3</sup>/га, то в рабочих он не превышал 9 м<sup>3</sup>/га, а в ряде секций отсутствовал.

Средние высота и диаметр в рабочих секциях варьируют от 11,1 до 18,0 м (средняя 14,0 м) и от 11,9 до 15,8 см (средний 13,9 см) соответственно. Запас древостоя – от 244 до 376 м<sup>3</sup>/га (средний 278 м<sup>3</sup>/га). Все древостои высокополнотные и характеризуются средней относительной полнотой 1,2 при классах бонитета V–Va.

В целях упрощения анализа таксационных показателей секции были сгруппированы с учетом градаций интенсивности изреживания. Средние таксационные показатели древостоев приведены в табл. 2.



Таблица 1

**Основные таксационные показатели сосновых древостоев на контрольных и рабочих секциях ППП**  
**The main inventory indicators of pine stands in the control and working sections of the permanent trial plots**

Показатель	Значение показателя при интенсивности рубок ухода, %																					
	0*	49,7	47,6	27,0	47,1	26,7	25,3	47,8	33,4	0*	41,4	23,0	12,9	0*	32,2	32,9	12,5	22,3	30,3	38,2	0*	
Высота, м	12,6	13,6	14,8	14,1	14,2	14,2	13,1	14,0	13,4	13,5	14,2	14,4	12,1	13,0	15,0	13,2	15,1	13,4	14,6	15,8	11,9	
Диаметр, см	11,1	15,5	14,7	13,8	15,3	14,4	13,1	14,8	14,0	11,3	13,3	12,7	11,3	11,3	16,3	13,7	13,8	12,4	14,2	18,0	11,4	
Возраст, лет	96	96	96	96	96	96	97	97	97	97	97	97	96	96	96	96	96	100	95	95	95	
Густота	5582	2080	2120	3043	1740	2563	2888	2000	2540	5577	2360	3343	4300	3692	1741	2520	2878	3440	2240	1520	5100	
В том числе сухой, экз./га	1291	20	–	157	60	112	76	–	100	1173	–	85	328	753	100	80	150	320	40	20	860	
Полнога абсолютная, см <sup>2</sup> /га	54,2	39,2	35,9	45,6	37,3	41,7	39,1	34,5	38,9	55,8	32,7	42,3	43,3	37,3	36,2	37,0	43,0	41,4	35,4	38,7	51,7	
Полнога относительная	1,6	1,1	1,0	1,3	1,1	1,2	1,2	1,0	1,2	1,6	1,0	1,2	1,4	1,1	1,0	1,1	1,2	1,2	1,0	1,1	1,5	
Запас	368	264	267	329	269	301	270	245	268	394	230	303	281	256	269	253	322	291	260	293	345	
В том числе сухой, м <sup>3</sup> /га	23	1	–	3	2	8	1	–	4	18	–	3	7	12	4	3	4	9	2	1	11	

\*Контроль.

Таблица 2

Средние таксационные показатели 95–100-летних сосновых древостоев через 70 лет после рубок ухода различной интенсивности  
Average inventory indicators of 95–100-year-old pine stands 70 years after improvement thinning of various intensity

Интенсивность рубки	Диаметр, см	Высота, м	Плотность		Густота произрастания (в том числе сухостой, экз./га)	Запас (в том числе сухостой, м <sup>3</sup> /га)	Класс бонитета	Количество, экз./га	
			абсолютная, м <sup>2</sup> /га	относительная				валежника	ветровала
Отсутствует	11,3±0,1	12,8±0,3	49,8±4,2	1,5±0,1	4987,8±235,9 (1019,5±126,8)	340,8±21,2 (16,0±2,8)	V,0±0,0	1190,0±96,8	15,0±4,0
Слабая	12,6±1,2	13,6±1,5	43,2±0,2	1,3±0,1	3594,0±453,2 (239,5±89,5)	300,0±22,5 (5,5±1,5)	V,0±0,0	135,5±21,5	45,5±6,5
Умеренная	13,3±0,4	13,8±0,2	42,0±1,0	1,2±0,02	3055,4±118,7 (150,2±44,7)	298,4±8,9 (4,8±1,6)	V,0±0,0	106,6±16,2	122,8±14,5
Сильная	14,6±0,6	14,1±0,4	36,9±0,7	1,1±0,05	2260,0±174,9 (80,0±14,1)	262,6±3,4 (3,3±0,5)	IV,7±0,2	55,0±9,6	110,0±23,8
Очень сильная	15,3±0,6	14,4±0,3	36,4±1,0	1,1±0,02	1970,0±121,5 (16,7±9,5)	261,4±8,7 (0,7±0,3)	IV,7±0,2	85,0±10,9	28,3±4,0

Анализ данных табл. 2 позволяет оценить последствия рубок ухода при их различной интенсивности. Доминирование низового метода при изреживании и увеличение площади роста оставленных на доращивание деревьев обусловили значительный рост средних высоты и диаметра в рабочих секциях по сравнению с контролем. В частности, средний диаметр при очень высокой интенсивности через 70 лет после первого приема рубки превышает этот показатель контроля в 1,4 раза, а средняя высота – в 1,1 раза. Увеличение средних высоты и диаметра оказалось пропорционально интенсивности изреживания.

В то же время рубки привели к снижению среднего запаса древостоев в рабочих секциях. Через 70 лет после рубок ухода очень сильной, сильной и умеренной интенсивности этот показатель здесь был ниже, чем в контроле, на 23,3; 22,9 и 12,4 % соответственно. Даже при слабой интенсивности рубки запас древостоя оказался ниже, чем в контроле, на 12,0 %.

Анализ достоверности различий средних таксационных показателей приведен в табл. 3.

Таблица 3

**Значения показателей дисперсии таксационных характеристик древостоев по вариантам опыта**  
**Values of dispersion indices of stands inventory indicators by experiment options**

Сравниваемые интенсивности изреживания	Диаметр		Высота		Запас		F-критическое
	F-фактическое	P-значение	F-фактическое	P-значение	F-фактическое	P-значение	
Отсутствует и слабая	2,71	0,171	0,66	0,463	0,43	0,548	7,71
Отсутствует и умеренная	23,03	0,003	7,05	0,032	1,31	0,289	5,59
Отсутствует и сильная	30,23	0,002	5,45	0,058	5,26	0,061	5,98
Отсутствует и очень сильная	25,53	0,0009	12,47	0,007	6,63	0,032	5,32
Слабая и умеренная	0,66	0,454	0,07	0,799	5,16	0,009	6,61
Умеренная и сильная	3,65	0,098	0,19	0,675	9,18	0,019	5,59
Сильная и очень сильная	0,61	0,457	0,52	0,488	0,02	0,902	5,32
Слабая и сильная	2,91	0,163	0,16	0,711	6,07	0,069	7,71
Умеренная и очень сильная	6,63	0,029	2,04	0,187	6,48	0,031	5,12

По данным табл. 3 можно отметить, что достоверные различия средних диаметров и высот между контрольными и рабочими секциями зафиксированы только после проведения рубок ухода интенсивностью выше умеренной, а диаметра и запаса – умеренной и очень сильной интенсивности.

Поскольку рубки ухода осуществлялись по низовому методу, даже через 70 лет после их проведения густота древостоев в рабочих секциях оказалась ниже, чем в контроле. При этом прослеживается четкая зависимость снижения густоты пропорционально интенсивности изреживания. В секциях, где были проведены рубки ухода слабой интенсивности, густота древостоя в 1,2 раза ниже, чем в контроле, при умеренной интенсивности – в 1,4 раза, при сильной –

в 1,8 раза и при очень сильной – в 2 раза. Аналогичная закономерность прослеживается при анализе относительной полноты. Однако следует отметить, что древостои во всех рабочих секциях имеют относительную полноту выше 1, а в контроле она составляет  $1,5 \pm 0,1$ . Последнее свидетельствует о необходимости уточнения региональных таблиц сумм площадей поперечных сечений и запасов на 1 га нормальных древостоев сосны обыкновенной. Соблюдение требований нормативных документов по рубкам ухода, основанных на регулировании относительной полноты древостоев с использованием действующих таблиц, может привести к чрезвычайному изреживанию и потере древостоями устойчивости.

Характерной особенностью сосняков района исследований является их повышенная загущенность [14–16]. Это подтверждается данными контрольных секций ППП наших исследований. В 95–100-летнем возрасте густота сосновых древостоев в контроле составляет  $3,97 \pm 0,34$  тыс. шт./га. Есть все основания полагать, что завышенная густота сосновых древостоев в сухих условиях произрастания Казахского мелкосопочника является их ответной реакцией на неблагоприятные природные факторы с целью повышения устойчивости. Указанный факт следует учитывать при планировании и проведении рубок ухода.

Выполненные исследования показали, что контрольные секции ППП характеризуются значительно бóльшим по сравнению с рабочими секциями объемом легковоспламеняющихся напочвенных горючих материалов. Так, количество валежника в контроле в 8,8–21,6 раза превышает аналогичный показатель рабочих секций. Такая же ситуация наблюдается в отношении сухостоя. Если его запас в контрольных секциях составляет в среднем  $16,0 \pm 2,8$  м<sup>3</sup>/га, то в рабочих он не превышает  $5,5 \pm 1,5$  м<sup>3</sup>/га, а в секциях, где были проведены рубки ухода очень высокой интенсивности, – его объем лишь  $0,7 \pm 0,3$  м<sup>3</sup>/га.

Наличие медленно разлагающегося в условиях сухого жаркого климата старого валежа резко увеличивает интенсивность лесных низовых пожаров в случае их возникновения, а наличие сухостоя в сочетании с высокой густотой древостоя в контрольных секциях создает реальную угрозу развития низовых пожаров в верховые. Следует отметить, что в контрольных секциях древостои характеризуются минимальным диаметром, а следовательно, наименее устойчивы к термическому воздействию лесных пожаров. Другими словами, можно говорить о положительном влиянии рубок ухода на повышение пожароустойчивости сосновых насаждений Казахского мелкосопочника.

Интересная особенность зафиксирована в отношении свежего ветровала. Высокая густота древостоев способствует повышению их устойчивости к неблагоприятным природным факторам, в частности к сильному ветру. Поэтому минимальное количество свежего ветровала обнаружено в контрольных секциях и секциях, пройденных 70 лет назад рубками ухода слабой интенсивности. При увеличении интенсивности рубки до умеренной количество ветровальных деревьев возрастает, а затем снова снижается и составляет в секциях, пройденных рубками ухода очень высокой интенсивности,  $28,3 \pm 4,0$  шт./га (см. табл. 2).

Анализ взаимосвязи количества ветровальных деревьев и старого ветровала с густотой произрастания в секциях с различной интенсивностью изреживания в сухих сосняках ГНПП «Бурабай» (рис. 1) показывает отсутствие четких зависимостей ( $R^2 = 0,16–0,37$ ). Исключение составляют секции с проведенными рубками ухода умеренной и сильной интенсивности изреживания, здесь отмечается достаточно тесная взаимосвязь количества ветровальных деревьев с густотой произрастания древостоев ( $R^2 = 0,89–0,97$ ).

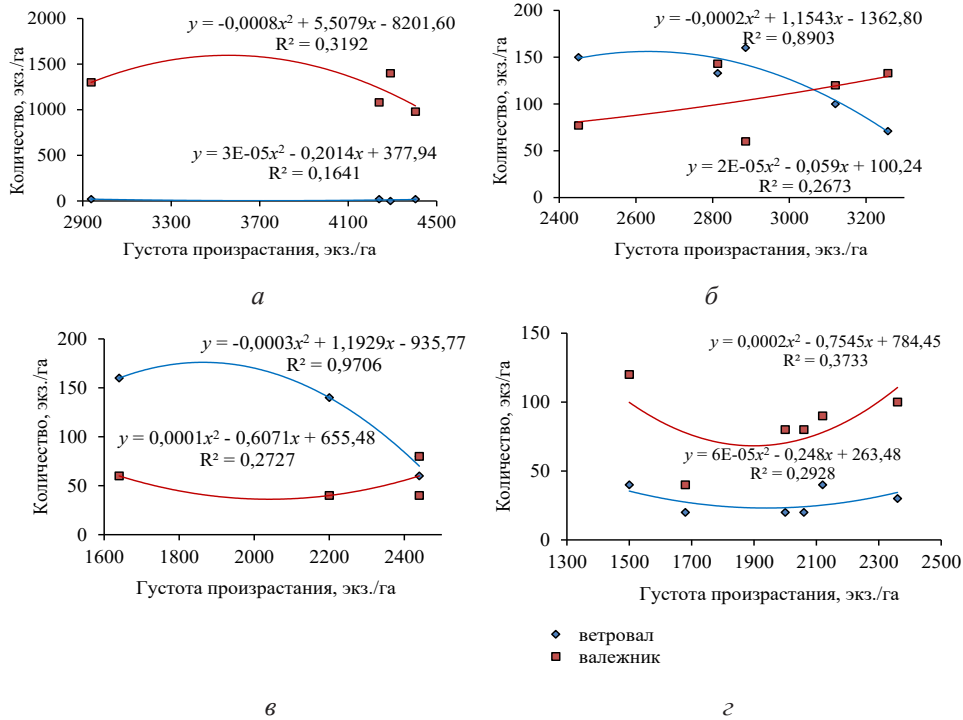


Рис. 1. Взаимосвязь густоты произрастания с количеством ветровальных деревьев и валежника в сухих сосняках ГНПП «Бурабай»: а – контроль; б – умеренная; в – сильная; г – очень сильная интенсивность изреживания

Fig. 1. Correlation between the growth density and the number of windfall trees, deadwood in dry pine forests of the Burabay National Park: а – control; б – moderate; в – high; г – very high care intensity

Распределение деревьев по ступеням толщины в исследуемых сосняках (рис. 2) свидетельствует о том, что в контрольных секциях ряд распределения характеризуется как асимметричная кривая, смещенная влево в сторону более мелких ступеней толщины. В рабочих секциях, пройденных рубками ухода слабой, умеренной и сильной интенсивности, кривые распределения приближены к симметричной кривой и практически идентичны по своему строению, преобладают деревья ступени толщины 12 см. В секциях, пройденных рубкой очень сильной интенсивности, отмечается смещение кривой распределения в сторону более крупных ступеней толщины с преобладанием в древостое деревьев ступени толщины 16 см.

Распределение деревьев по естественным ступеням толщины в контрольных и рабочих секциях, представленное на рис. 3, свидетельствует о растянутости рядов в сравнении с нормальным распределением (по А.В. Тюрину) во всех секциях. Количество ступеней толщины превышает более чем в 2 раза количество ступеней толщины при нормальном распределении. Только в секциях, пройденных рубками ухода очень сильной интенсивности, отмечается уменьшение растянутости кривой распределения на 3 ступени. После проведения рубок ухода интенсивностью 12,5–49,7 % по запасу в рассматриваемых сосняках кривая имеет симметричный вид, но при этом сохраняется ее растянутость.

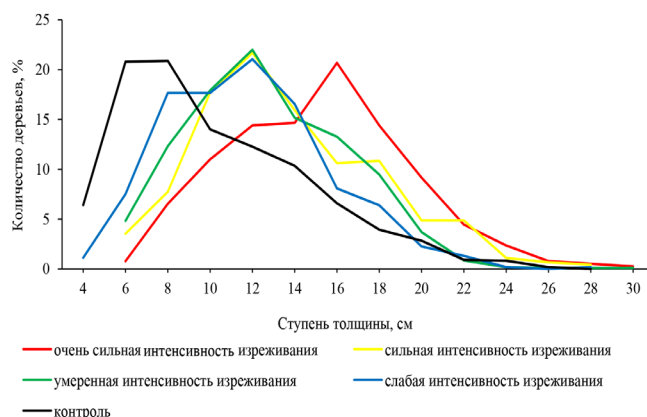


Рис. 2. Распределение деревьев в сосняках ГНПП «Бурабай» по ступеням толщины в зависимости от интенсивности изреживания

Fig. 2. Distribution of trees in pine forests of the Burabay National Park by diameter classes depending on the care intensity

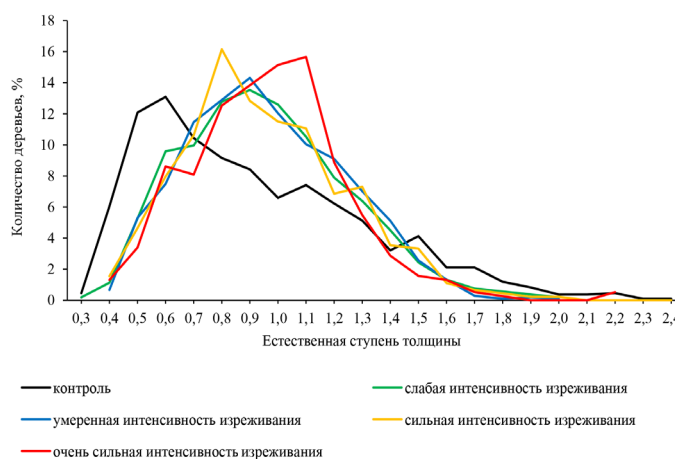


Рис. 3. Распределение деревьев по естественным ступеням толщины в сухих сосняках ГНПП «Бурабай»

Fig. 3. Distribution of trees in dry pine forests of the Burabay National Park by natural diameter classes

Приведенные данные являются подтверждением того, что в загущенных сосняках сухих условий произрастания Северного Казахстана рубки ухода слабой, умеренной, сильной и очень сильной интенсивности изреживания оказывают влияние на строение древостоя за счет уборки мелких, отставших в росте деревьев. Это повышает устойчивость древостоев к неблагоприятным природным и антропогенным факторам.

Восстановление запаса древесины во всех рабочих секциях после рубок ухода происходит очень медленно. Даже через 70 лет после проведения рубок ухода слабой интенсивности средний запас составляет  $295,5 \pm 22,5$  м<sup>3</sup>/га при  $324,8 \pm 28,3$  м<sup>3</sup>/га в контроле. С увеличением интенсивности изреживания различия между рабочими и контрольными секциями по запасу древесины возрастают. Ни на одной рабочей секции, пройденной рубками ухода, через 70 лет запас стволовой древесины не достиг аналогичного показателя контроля. Это свидетельствует о том, что при проведении рубок ухода в сухих сосняках Казахского мелкосопочника нельзя ориентироваться на получение большого количества дополнительной древесины. Задачей рубок ухода в данных условиях будет повышение пожароустойчивости и рекреационной привлекательности насаждений в сочетании со снижением пожарной опасности в них.

*Выводы*

1. Через 70 лет после рубок ухода в 25–30-летних чистых одновозрастных сухих сосняках средняя высота и диаметр превышают аналогичные показатели контрольных древостоев на 11–36 и 6–12 % соответственно.

2. Рубки ухода способствуют снижению количества напочвенных горючих материалов и сухостоя, что в сочетании с увеличением средних диаметров древостоев свидетельствует о повышении их пожароустойчивости и минимизации риска перехода низовых пожаров в верховые.

3. Даже через 70 лет после рубок ухода запас в рабочих секциях остается ниже запаса контрольных древостоев на 9–10 % при слабой и умеренной интенсивности рубки и на 19–20 % при сильной и очень сильной интенсивности.

4. Высокая относительная полнота сосновых древостоев в контрольных и рабочих секциях делает необходимым уточнение региональных стандартных таблиц сумм поперечных сечений и запасов на 1 га нормальных древостоев сосны обыкновенной.

5. Специфика роста и строения сухих сосняков Казахского мелкосопочника обуславливает необходимость разработки региональных рекомендаций по ведению хозяйства в таких древостоях с учетом высокой природной пожарной опасности, особенностей лесорастительных условий и целевого назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абузов А.В., Рябухин П.Б. Технологии промежуточных рубок на труднодоступных территориях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 117–130.

Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Technologies of Intermediate Felling in Difficult to Access Areas. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 4, pp. 117–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-117-130>

2. Борисов А.Н., Иванов В.В., Петренко А.Е. Формирование пространственной структуры сосновых древостоев при рубках ухода // Лесоведение. 2019. № 1. С. 7–18.

BorISOV A.N., Ivanov V.V., Petrenko A.E. Formation of Spatial Structure of Pine Stands Formed by Improvement Cuttings. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2019, no. 1, pp. 7–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819010042>

3. Бузыкин А.И., Пшеничникова Л.С. Реакция средневозрастных сосняков на рубки ухода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 1. С. 28–33. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/a53/a53089e829e0519a2e7e3b20dca514b2.pdf>

Buzykin A.I., Pshenichnikova L.S. Response of Middle-Aged Pineries to Cleaning Cutting. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2009, no. 1, pp. 28–33. (In Russ.).

4. Данилов Д.А., Беляева Н.В., Ковалев Н.В. Влияние рубок ухода на рост и товарную структуру смешанных древостоев сосны и ели кисличного типа леса // Лесотехн. журн. 2014. № 2. С. 31–36.

Danilov D.A., Kovalev N.V., Beliaeva N.V. Effect of Thinning on Growth and Commodity Structure of Mixed Stands of Pine and Spruce of Wood-Sorrel Family Type Forests. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2014, no. 2, pp. 31–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/4504>

5. 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 // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 9–19.



Zalesov S.V., Belov L.A., Opletaev A.S., Magasumova A.G., Kartashova T.Yu., Debkov N.M. Formation of Siberian Pine Forests by Improvement Felling on Former Agricultural Lands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2021, no. 1, pp. 9–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-9-19>

6. Залесов С.В., Залесова Е.С., Данчева А.В., Федоров Ю.В. Опыт рубок обновления в одновозрастных рекреационных сосняках подзоны северной лесостепи // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6. С. 20–31. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/45c/2--opyt-rubok-obnovleniya-v-odnovozrastnykh-rekreatsionnykh-sosnyakh-podzony-severnoy-lesostepi.pdf>

Zalesov S.V., Zalesova E.S., Dancheva A.V., Fedorov Ju.V. Experience of Regeneration Fellings in the Even-Aged Pine Forests of the Northern Forest-Steppe Subzone. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2014, no. 6, pp. 20–31. (In Russ.).

7. Залесова Е.С. Лесоводственная эффективность опытных рубок ухода 1952–1983 гг. в сосняках подзоны южной тайги Урала: дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2013. 194 с.

Zalesova E.S. *Silvicultural Efficiency of Experimental Improvement Thinning in 1952–1983 in Pine Forests of the Southern Taiga Subzone of the Urals*: Cand. Agric. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2013. 194 p. (In Russ.).

8. Козлов В.А., Кистерная М.В., Неронова Я.А. Влияние лесохозяйственных мероприятий на плотность и химический состав древесины сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 6. С. 7–13. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/355/355d-8c4ebe8a8a4c97f77ea273271396.pdf>

Kozlov V.A., Kisternaya M.V., Neronova Ya.A. Influence of Forestry Measures on Density and Chemical Wood Composition of Scotch Pine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2009, no. 6, pp. 7–13. (In Russ.).

9. Магасумова А.Г., Новоселова Н.Н., Залесова Е.С. Рубки ухода в насаждениях, формирующихся на бывших сельскохозяйственных угодьях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 5. С. 52–56. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/0a5/bccw8.pdf>

Magasumova A.G., Novoselova N.N., Zalesova E.S. Thinning in Stands Formed on Former Agricultural Lands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2010, no. 5, pp. 52–56. (In Russ.).

10. Макаренко А.А., Муканов Б.М. Рубки ухода в сосняках Казахстана. Алматы: Бастау, 2002. 219 с.

Makarenko A.A., Mukanov B.M. *Improvement Thinning in Pine Forests of Kazakhstan*. Almaty, Bastau Publ., 2002. 219 p. (In Russ.).

11. Мальшев В.В. Оптимизация режимов рубок ухода в сосновых насаждениях // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2013. № 4. С. 36–41.

Malyshev V.V. Mode Optimization Thinning in Pine Plantations. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy XXI veka: teoria i praktika* = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice, 2013, no. 4, pp. 36–41. (In Russ.).

12. Минниханов Р.Н., Мусин Х.Г. Реализация концепции воспроизводства и лесопользования в малолесных регионах // Изв. СПбЛТА. 2017. Вып. 219. С. 47–57.

Minnikhanov R.N., Musin H.G. Concept of Regeneration and Forest Management in Sparsely Forest-Poor Regions. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2017, iss. 219, pp. 47–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2017.219.47-57>

13. Мусин Х.Г. Эффективность ландшафтных рубок в рекреационных лесах // Вестн. БГАУ. 2013. № 2. С. 115–117.

Musin H.G. Efficiency of Landscape Cabins in the Recreational Woods. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 115–117. (In Russ.).

14. Панкратов В.К. Необходимость проведения рубок ухода в вязовых насаждениях с целью омоложения // Леса России и хозяйство в них. 2021. № 2(77). С. 35–41.



Pankratov V.K. The Need for Cutting in Elm Stands for the Purpose of Rejuvenation. *Forests of Russia and the Economy in Them*, 2021, no. 2(77), pp. 35–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.51318/FRET.2021.49.75.004>

15. Сеннов С.Н. Методические рекомендации по закладке постоянных пробных площадей на рубки ухода. Л.: ЛенНИИЛХ, 1972. 20 с.

Sennov S.N. *Guidelines for Laying out Permanent Trial Plots for Thinning*. Leningrad, LenNIILKh Publ., 1972. 20 p. (In Russ.).

16. Сеннов С.Н. Итоги 60-летних наблюдений за естественной динамикой леса. СПб.: СПбНИИЛХ, 1999. 95 с.

Sennov S.N. *Results of 60-Year Observations of Natural Forest Dynamics*. Saint Petersburg, SPbNIILKh Publ., 1999. 95 p. (In Russ.).

17. Ebel A.V., Ebel Y.I., Zalesov S.V., Ayan S. The Effects of Different Intensity of Thinning on the Development in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stands in Kazakh Uplands. *Alinteri Journal of Agriculture Science*, 2019, vol. 34, iss. 2, pp. 182–187. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.639014>

18. Masaka K., Sato H., Torita H., Kon H., Fukuchi M. Thinning Effect on Height and Radial Growth of *Pinus thunbergii* Parlat. Trees with Special Reference to Trunk Slenderness in a Matured Coastal Forest in Hokkaido, Japan. *Journal of Forest Research*, 2013, vol. 18, iss. 6, pp. 475–481. <https://doi.org/10.1007/s10310-012-0373-y>

19. Seiwa K., Eto Y., Hishita M., Masaka K. Effects of Thinning Intensity on Species Diversity and Timber Production in a Conifer (*Cryptomeria japonica*) Plantation in Japan. *Journal of Forest Research*, 2012, vol. 17, iss. 6, pp. 468–478. <https://doi.org/10.1007/s10310-011-0316-z>

20. Wu L., Liu J., Takashima A., Ishigaki K., Watanabe Sh. Effect of Selective Logging on Stand Structure and Tree Species Diversity in a Subtropical Evergreen Broad-Leaved Forest. *Annals of Forest Science*, 2013, vol. 70, pp. 535–543. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0292-x>

21. Zalesov S., Dancheva A.V., Ayan S., Suyundikov Z.O., Rachimzhanov A.N., Razhnov M.R., Opletaev A.S. Silvicultural Efficiency of the Thinning Efficiency of *Pinus sylvestris* L. Plantation in the Dry Subzone of Northern Kazakhstan Steppes. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 220–228. <https://doi.org/10.17475/kastorman.849517>

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

Научная статья

УДК 630\*165.3:630\*11

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-22-37

### Оценка отклика на изменение климата в опытах с происхождениями *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) на севере Русской равнины

Е.Н. Наквасина<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук, проф.; Researcher ID: [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Н.А. Прожерина<sup>2</sup>, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; Researcher ID: [A-5917-2013](https://orcid.org/0000-0002-5067-7007),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5067-7007>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e.nakvasina@narfu.ru<sup>✉</sup>

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова УрО РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; pronad1@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.01.21 / Одобрена после рецензирования 23.04.21 / Принята к печати 25.04.21

**Аннотация.** Изучена внутривидовая реакция ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.)) на климатические изменения на основе данных о росте 15 климатотипов в 31-летних географических культурах севера Русской равнины (Архангельская и Вологодская области), имитирующих потепление и похолодание. Сравнили фактические высоту и диаметр в пункте испытания и расчетную высоту в местах произрастания исходных насаждений, определенную путем перерасчета фактических данных о росте потомства через широтные коэффициенты роста, предложенные И.В. Волосевичем для севера Русской равнины. Разница между расчетными и фактическими показателями роста соответствующего климатотипа в пункте испытания составила отклик климатотипа на изменение условий произрастания. Отклик сопоставляли с различиями в климатических характеристиках (сумма эффективных температур выше 10 °С) и географических координатах мест происхождения и мест произрастания ели. Ель имеет примерно одинаковую норму реакции при перемещении потомства на равную величину градиента (северная широта) к югу или к северу и при изменении климатического фактора (сумма температур выше 10 °С) в сторону потепления или похолодания. При изменении суммы температур выше 10 °С на каждые 100 °С разница в приросте по высоте и диаметру будет составлять 0,48 м и 0,42 см соответственно. На каждый градус изменения северной широты – в среднем 0,50 м и 0,44 см по высоте и диаметру соответственно. Для происхождений из подзоны северной тайги, преимущественно представленных елью сибирской (*P. obovata*), отклик реакции вида будет в 2 раза ниже, чем для происхождений ели гибридной (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.)) из подзоны средней тайги. Рассчитанные величины отклика по высоте и диаметру для ели обыкновенной необходимо учитывать при регламентации перебросок семян, использовать в прогнозах при адаптации мероприятий лесного хозяйства к предстоящим климатическим изменениям.

**Ключевые слова:** ель, изменение климата, отклик на изменение климата, реакция на изменение климата, высота ели, диаметр ели, географические происхождения, север Русской равнины



**Благодарности:** Авторы благодарят Северный НИИ лесного хозяйства за предоставленные материалы исследований географических культур ели и отмечают высокую роль Д.Х. Файзулина и Н.В. Улиссовой при инвентаризации объектов единого генетико-селекционного комплекса 2010 г. в Архангельской и Вологодской областях соответственно; выражают искреннюю благодарность руководителю ГИС Центра САФУ А.Г. Волкову за помощь в подготовке данных для проведения расчетов. Исследования выполнены в рамках темы «Структура и изменчивость популяций лесных сообществ на приарктических территориях Севера Русской равнины» № АААА-А18-118011690221-0.

**Для цитирования:** Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А. Оценка отклика на изменение климата в опытах с происхождениями *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) на севере Русской равнины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 22–37. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-22-37>

Original article

### Assessment of Response to Climate Change in Experiments with the Origins of *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) in the North Russian Plain

**Elena N. Nakvasina**<sup>1</sup>✉, *Doctor of Agriculture, Prof.*; *ResearcherID:* [A-5165-2013](https://orcid.org/0000-0002-7360-3975),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

**Nadezhda A. Prozherina**<sup>2</sup>, *Candidate of Biology, Senior Research Scientist*;

*ResearcherID:* [A-5917-2013](https://orcid.org/0000-0002-5067-7007), *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-5067-7007>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [e.nakvasina@narfu.ru](mailto:e.nakvasina@narfu.ru)✉

<sup>2</sup>N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [pronad1@yandex.ru](mailto:pronad1@yandex.ru)

*Received on January 29, 2021 / Approved after reviewing on April 23, 2021 / Accepted on April 25, 2021*

**Abstract.** The article studies the intraspecific response of European spruce (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.)) to climatic changes on the basis of data on the growth of 15 provenances in 31-year-old provenance plot of the North Russian Plain (Arkhangelsk and Vologda regions) simulating warming and cooling. We compared the actual height and diameter at the test site and the calculated height at the places of growth of the source stands, determined by recalculating the actual progeny growth data through the latitudinal growth coefficients proposed by I.V. Volosevich for the North Russian Plain. The difference between the calculated and actual growth rates of the corresponding provenance at the test site represented the response of the provenance to the change in growing conditions. The response was crosschecked with differences in climatic characteristics (sum of effective temperatures above 10 °C) and geographic coordinates of the places of origin and growth of spruce. Spruce has approximately the same response rate if offspring move by an equal amount of gradient (north latitude) to the south or to the north and if the climatic factor (sum of temperatures above 10 °C) changes towards warming or cooling. While the sum of temperatures changes above 10 °C for every 100 °C, the difference in growth in height and diameter will be 0.48 m and 0.42 cm, respectively; for each degree of change in northern latitude, on average, 0.50 m and 0.44 cm in height and diameter, respectively. However, for species from the northern



taiga subzone, mainly represented by Siberian spruce (*P. obovata*) the response of the species will be half as much than for the origin of hybrid spruce (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.)) from the middle taiga subzone. The calculated values of response by height and diameter for European spruce should be considered when regulating seed transfer and used in forecasts for the adaptation of forestry measures to the expected climatic changes.

**Keywords:** spruce, climate change, response to climate change, spruce height, spruce diameter, geographical origins, North Russian Plain

**Acknowledgments:** The authors are grateful to the Northern Research Institute of Forestry for the provided research materials of spruce geographical crops and acknowledge the important role of D.H. Fayzulin and N.V. Ulissova in the inventory of the objects of the Unified Genetic Breeding Complex in 2010 in the Arkhangelsk and Vologda regions, respectively. The authors are sincerely grateful to A.G. Volkov, the head of the NArFU's GIS Center, for his assistance in preparing the data for the calculations. The research was carried out within the framework of the project "Structure and Variability of Populations of Forest Communities in the Subarctic Territories of the North Russian Plain" No. AAAA-A18-118011690221-0.

**For citation:** Nakvasina E.N., Prozherina N.A. Assessment of Response to Climate Change in Experiments with the Origins of *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) in the North Russian Plain. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 22–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-22-37>

### Введение

Современные изменения климата, прежде всего связанные с повышением температуры и колебаниями в поступлении осадков, делают актуальным вопрос о влиянии данных изменений на леса и обуславливают необходимость разработки стратегии превентивных адаптационных мероприятий по управлению лесным хозяйством [3]. Для этого важен прогноз отклика на климатические изменения основных лесообразующих пород [22]. С одной стороны, ожидается повышение их продуктивности за счет увеличения продолжительности вегетационного периода и сроков роста, усиления фотосинтетической активности, с другой, возможно уменьшение производительности в результате снижения количества осадков и возникновения засухи [12, 14, 19, 20, 24].

Климатическая переменная вносит большой вклад в рост деревьев, на 62 % обеспечивая формирование годичного кольца [15]. Увеличение высоты деревьев может составить до 45 % к 2080 г. [19]. Однако возможно и адаптивное запаздывание отклика древесных пород на изменения климата на несколько поколений [12] или на 100 лет [27], что связано с эффектом «эволюционной адаптации» [16] в связи с генетическими изменениями.

При изучении вопроса адаптации древесных пород к климатическим изменениям важно учитывать дифференциацию отклика породы в пределах ареала ее произрастания [22, 24, 26, 28, 29], особенно для видов с обширной территорией произрастания [21]. То есть в вопросе об адаптации видов будет иметь значение их генетическая изменчивость, отраженная через внутривидовую изменчивость популяций [19]. Если не принять во внимание генетическую изменчивость и фенотипическую пластичность породы, прогнозы могут оказаться преувеличенными или преуменьшенными [17].

Решению вопроса о внутривидовой реакции вида на климатические изменения помогают опыты с происхождениями (географические культуры), когда в одном пункте испытания, в одних климатических условиях, выращивают потомства из разных регионов с неодинаковыми климатическими характеристиками [13, 18, 19, 25, 28]. Географические культуры остаются единственной природной лабораторией, позволяющей оценить реакцию вида на изменение климата [7]. Выращивание в пунктах испытания северных или южных потомств по отношению к месту пункта испытания позволяет имитировать потепление или похолодание.

Опыты с происхождениями дают возможность моделировать реакцию растений на изменение климатических характеристик, учитывая различия в месте происхождения потомства и месте его произрастания [15, 18, 26]. Однако не всегда удается сравнить различия в росте одновозрастного потомства в пункте испытания и месте происхождения. Это связано с набором происхождений в коллекциях. Часто в опытах Западной Европы отсутствуют происхождения сосны, ели и других пород из северных регионов, поэтому для оценки реакции вида, произрастающего в северных широтах, используют уравнения рост–климат, полученные по данным более южных происхождений [16], что может привести к ошибочным прогнозам продуктивности лесов в связи с климатическими изменениями.

Важно получить максимальное количество информации, анализируя опыты с происхождениями в различных регионах в пределах ареала произрастания породы/вида, чтобы проследить отклик различных внутривидовых рас, в том числе связанный с их географическим происхождением. Это может дать неожиданные результаты, так как разная реакция на климатические изменения ожидаема даже при произрастании одного вида в различных топоэкологических условиях [1].

В литературе есть данные о влиянии происхождения (внутривидовой изменчивости) вида, однако они неоднозначны из-за различий подходов исследований и набора вариантов в коллекциях происхождений. Одни авторы считают [15, 18, 19, 28], что наиболее чувствительны к климатическим изменениям южные происхождения, другие [15, 22, 25, 26] – что северные. При этом выводы могут иметь уточнения о небольшой величине различия, это связано с наследуемостью адаптивных признаков материнских насаждений [18]. Причина разного отклика северных и южных происхождений состоит в том, что происхождениям, материнские насаждения которых произрастают в более северных условиях, для отклика на изменения температуры нужны меньшие ее значения, а для южных происхождений – более высокие [21]. По мнению Ч. Матяша [6], ответная норма реакции проявляется на уровне фенотипа в соответствии с приспособляемостью вида (его расы) к условиям среды.

Предварительная проверка гипотезы о разной отзывчивости потомств сосны и ели, произрастающих в самых северных пунктах испытания на Русской равнине [7–9], показала наличие меньшего отклика по высоте и диаметру у северных потомств по сравнению с южными. Происхождения из Мурманской области (67° с. ш.) при ожидаемом уровне климатических изменений не достигнут параметров одновозрастных насаждений на широте испытания (62°54' с. ш.).

При моделировании отклика древесных пород необходимо учесть все регионы произрастания вида, его внутривидовую изменчивость и фенотипическую пластичность, что, вероятно, можно связать в том числе с исторической миграцией растительности. Это может дать неожиданные эффекты [23].

Цель исследования – изучение ответной реакции на климатические изменения (потепление и похолодание) ели обыкновенной (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.)) на внутривидовом уровне с использованием коллекции происхождений, произрастающих в 2 пунктах испытания в пределах севера Русской равнины, для оценки уровня реакции разных происхождений вида и разработки стратегии превентивных мер по адаптации лесохозяйственных технологий, в частности по отбору происхождений, наиболее адаптированных к климатическим изменениям.

#### *Объекты и методы исследования*

Для моделирования внутривидовой отзывчивости ели (*Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.)) на климатические изменения в географических культурах подобрали климатипы, имитирующие потепление и похолодание (табл. 1), т. е. выращиваемые в более теплых или в более холодных условиях относительно места происхождения материнских насаждений потомства. Диапазон подбора происхождений ограничивался территорией севера Русской равнины и был обусловлен использованием подхода и расчетов, предложенных И.В. Волосевичем и примененных нами ранее для изучения отклика сосны на климатические изменения [8].

Использовали ряд климатипов (географических рас), произрастающих в 2 пунктах испытания, входящих в государственную сеть географических культур 1970-х гг. (куратор объектов – Северный НИИ лесного хозяйства), в Плесецком районе Архангельской области (62,60° с. ш. 39,98° в. д.) и Череповецком районе Вологодской области (59,02° с. ш. 37,31° в. д.) – в северной и средней подзонах тайги по С.Ф. Курнаеву соответственно. Пункты испытания отличаются в широтном отношении, но близки по долготе, что исключает влияние меридионального перемещения на рост ели различных происхождений.

Использовали методику изучения роста климатипов [4], которую применяли ранее [10]. Проводили замеры диаметров не менее чем у 100 деревьев, выбранных случайно. Среднюю высоту определяли по графику высот, для его построения устанавливали высоты и диаметры на высоте груди не менее чем у 20 деревьев разных ступеней толщины в климатипе. Возраст культур на время исследования составил 31 год.

Основным принципом исследования реакции роста древесных пород с использованием коллекций потомств разного происхождения является изучение их роста в различных пунктах испытания. При этом устанавливают влияние на рост климатических характеристик, высоты над уровнем моря и других географических составляющих мест произрастания исходных (материнских) насаждений [18, 20, 26]. Рост климатипов, перенесенных в пункт испытания, сравнивается с ростом местного потомства (эталон, контроль) для каждого пункта испытания.



Таблица 1

Географические координаты, климатические характеристики, сохранность и рост климатипов ели  
 Geographical coordinates, climatic characteristics, preservation and growth of spruce provenances

№*	Местоположение		Географические координаты, град.		Лесорастительная зона/подзона**	Вид ели***	Сумма температур выше 10 °С, °С	Архангельская область		Вологодская область	
	область/республика/страна	лесхоз	с. ш.	в. д.				Диаметр, см	Высота, м	Диаметр, см	Высота, м
1	Мурманская область	Мончегорский	67°51'	32°57'	СТ	С	991	5,3	5,3	–	–
20	Архангельская область	Пинежский	64°45'	43°14'	СТ	С	1029	7,5	8,0	7,8	8,3
23		Холмогорский	64°14'	41°38'	СТ	С	1103	7,3	7,8	8,0	8,5
25	Республика Коми	Корткеросский	61°41'	51°31'	СрТ	С	1362	8,3	9,5	8,8	9,7
26		Сосногорский	63°27'	53°55'	СрТ	С	1100	8,3	9,9	8,6	9,6
2	Карелия	Сегежский	63°40'	34°23'	СрТ	ГС	1340	7,1	8,3	8,9	9,5
19	Архангельская область	Плесецкий	62°59'	40°24'	СрТ	ГС	1237	8,5	10,2	–	–
22		Котласский	61°15'	46°54'	СрТ	ГС	1467	8,1	9,9	8,6	9,5
28	Кировская область	Слободской	58°49'	50°06'	ЮТ	ГС	1742	7,0	8,3	9,8	10,2
3	Республика Карелия	Пряжинский	61°40'	33°33'	СрТ	ГЕ	1288	8,9	9,8	8,8	9,6
4		Пудожский	61°40'	36°40'	СрТ	ГЕ	1346	7,6	9,4	9,1	9,8
24	Вологодская область	Череповецкий	59°07'	37°57'	ЮТ	ГЕ	1613	9,5	10,1	10,0	10,7
27	Костромская область	Галичский	58°24'	42°20'	ЮТ	ГЕ	1704	7,0	8,6	9,5	11,4
5	Ленинградская область	Тосненский	59°30'	30°52'	ЮТ	Е	1634	8,5	10,7	10,3	11,5
8	Эстония	Вильядинский	58°24'	25°38'	СмЛ	Е	1698	7,6	9,6	9,5	10,2

\*Номера климатипов и названия мест происхождения исходных насаждений в соответствии с Реестром государственной регистрации географических культур. \*\*По Курнаеву: СТ – северная подзона тайги; СрТ – средняя подзона тайги; ЮТ – южная подзона тайги; СмЛ – зона смешанных лесов. \*\*\*С – *Picea obovata*; ГС – гибридная форма с преобладанием *P. obovata*; ГЕ – гибридная форма с преобладанием *P. abies*; Е – *P. abies*.

Изучая реакцию роста потомств, необходимо сравнивать рост одновозрастного потомства как в месте испытания, так и в месте произрастания исходного насаждения каждого климатипа. Однако подобрать подобные объекты, в частности созданные по однотипной технологии лесные культуры, достаточно затруднительно.

Мы использовали метод перерасчета исходных данных через широтные коэффициенты роста, предложенные И.В. Волосевичем [2]. Приведенные ученым коэффициенты позволяют по показателям роста эталонного местного климатипа рассчитать показатели для любой широты в пределах европейской части севера Русской равнины (58–67° с. ш.). Вычисления, проведенные Волосевичем, основываются на данных 98 метеостанций, 13 лесхозов и базы натуральных материалов и показывают сходство с показателями натурального обследования  $\pm 3,5\%$ .

Зная высоту и диаметр ели определенного происхождения в месте произрастания материнского насаждения (расчетные показатели) и в месте испытания (фактические показатели), можно сопоставить величину отклонений с различиями в климатических характеристиках и географических координатах. В качестве климатической характеристики использовали сумму эффективных температур выше 10 °С [5].

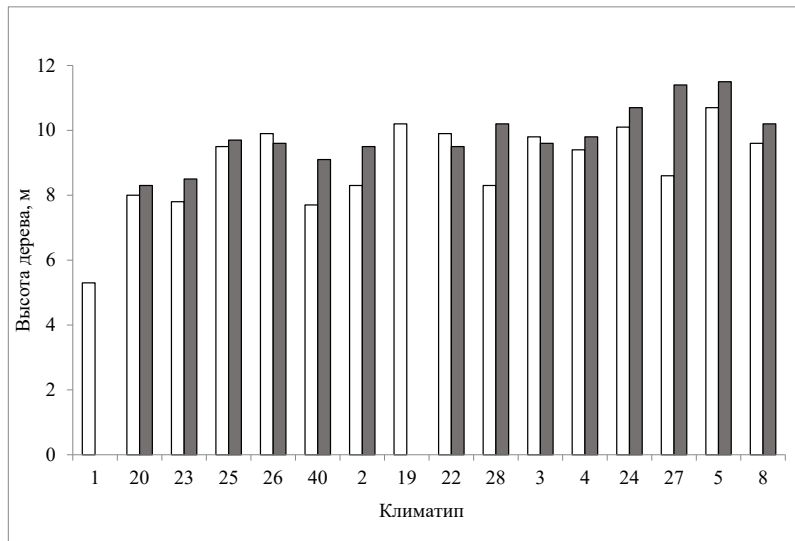
Разница между расчетными показателями (высота и диаметр в месте произрастания потомства) и фактическими показателями роста соответствующего климатипа в пункте испытания составила отклик климатипа на изменение условий произрастания.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

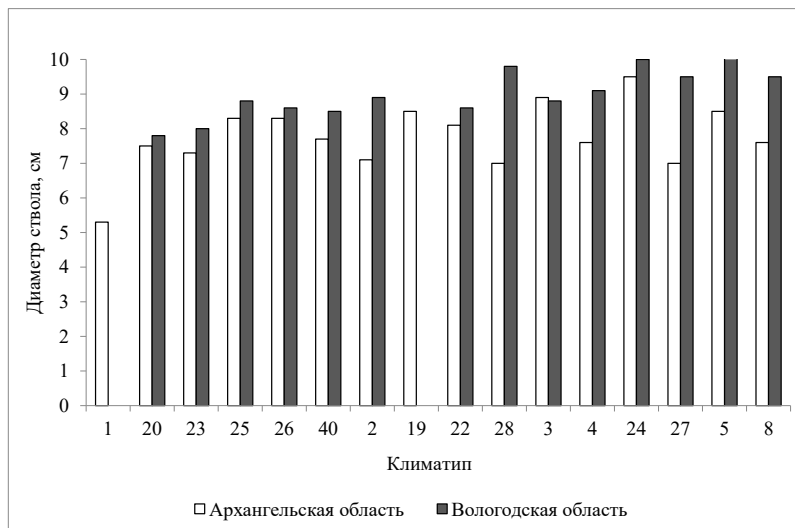
Скорость роста в высоту и по диаметру климатипов ели обыкновенной, произрастающих в географических культурах, как это было показано ранее [10], в определенной мере закреплена наследственно и зависит от географических и климатических характеристик мест произрастания исходных насаждений (рис. 1, табл. 2). Условия произрастания однотипного потомства обуславливают уровень реакции при изменении факторов произрастания материнских насаждений и потомства. В нашем эксперименте у потомства одного и того же происхождения, растущего в Вологодской области, высоты и диаметры выше по сравнению с потомством, произрастающим в Архангельской области. Однако важно оценить не рост потомства в пункте испытания, реакцию роста на местные условия, а отклик потомства, имеющего определенную наследственную специфику аллелей [10]. За счет разной реакции потомства при его выращивании в одних условиях на изменение климата – потепление или похолодание – ростовые показатели в пределах коллекции нивелируются. Коэффициент изменчивости коллекции изучаемых климатипов ели по высоте низкий и составляет 7,7–9,0 %, по диаметру – 15,3–16,2 %.

Показатели высоты и диаметра ели разного происхождения при испытании в одних условиях произрастания (Архангельская область) менее зависимы от абсолютных климатических показателей места происхождения, чем величина отклонений в линейном и радиальном приросте, реализованная при изменении условий роста (табл. 2). Наиболее значимым в ряду факторов, влияющих на рост, оказалось географическое положение климатипа (северная широта).





a



б

Рис. 1. Высота (а) и диаметр (б) климатипов ели обыкновенной в 31-летних географических культурах Архангельской и Вологодской областей. Номера климатипов соответствуют номерам в табл. 1

Fig. 1. Height (a) and diameter (b) of European spruce provenances in 31-year-old provenance plot in the Arkhangelsk and Vologda regions. Numbers of the provenances correspond to Table 1

Менее значимым – криволинейное изменение климатических характеристик в пределах севера Русской равнины, что хорошо иллюстрируют (рис. 2) материалы Волосевича. В крайних широтах (выше 63° с. ш., подзона северной тайги) при изменении северной широты на 1° изменения суммы температур более 10 °С в 2 раза выше (150 °С) по сравнению с территорией подзоны средней тайги в пределах широты 58–62° с. ш. (75 °С). Это необходимо учитывать при оценке реакции потомств и установлении зависимостей с показателями происхождения потомств.

Таблица 2

**Связь высоты и диаметра ели обыкновенной (коэффициент корреляции)  
с климатическими и географическими показателями мест происхождения  
и мест испытания**

**The relationship of height and diameter of European spruce (correlation coefficient)  
with climatic and geographical indices of places of origin and test sites**

Пункт испытания (область)	Высота, м		Диаметр, см	
	Северная широта, град.	Сумма температур выше 10 °С	Северная широта, град.	Сумма температур выше 10 °С
<i>С показателями места происхождения климатипа</i>				
Архангельская	-0,637*	0,457	-0,463	0,241
Вологодская	-0,854**	0,835**	-0,869**	0,885**
<i>С величиной отклонения показателей в месте происхождения климатипа и в месте испытания потомства</i>				
Архангельская	0,977**	-0,922**	0,972**	-0,914**
Вологодская	0,981**	-0,938**	0,980**	-0,933**

Примечание: Коэффициент корреляции достоверен на уровне значимости: \* – 0,05; \*\* – 0,01.

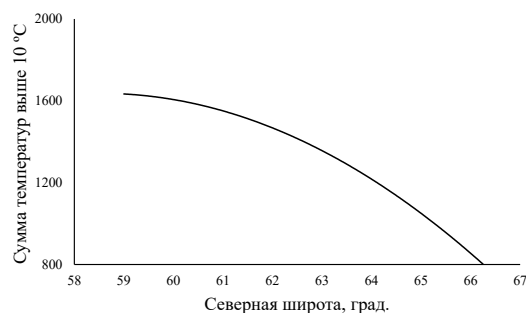


Рис. 2. Изменение суммы температур выше 10 °С в зависимости от широты местности в пределах севера Русской равнины (по Волосевичу)

Fig. 2. Changes in the sum of temperatures above 10 °С depending on the latitude of the area within the North Russian Plain (according to [2], p. 30)

Исходя из этого, мы взяли за основу расчетов не абсолютные высоты и диаметры потомства в пункте испытания, а величину отклика климатипа на изменение условий (потепление или похолодание) при испытании в географических культурах. Для этого важно было сравнить фактические высоту и диаметр потомства в месте испытания как результат генетических особенностей роста потомства разного происхождения в новых условиях среды не с местным климатипом, имеющим нулевую норму реакции (в нашем опыте это климатипы 19 и 24), а с ростом ели в одновозрастных культурах в месте происхождения потомства.

Соотнесли отклик климатипа по высоте и диаметру с учетом вектора изменения условий (потепление или похолодание) в зависимости от географического положения исходных насаждений потомства (северная широта) и суммы температур выше 10 °С (рис. 3). Как и в случае с оценкой фактических показателей роста потомства в пункте испытания (см. табл. 2), наиболее надежные показатели уравнений ( $R^2 = 0,95\text{--}0,96$ ) характерны для связи с северной широтой.

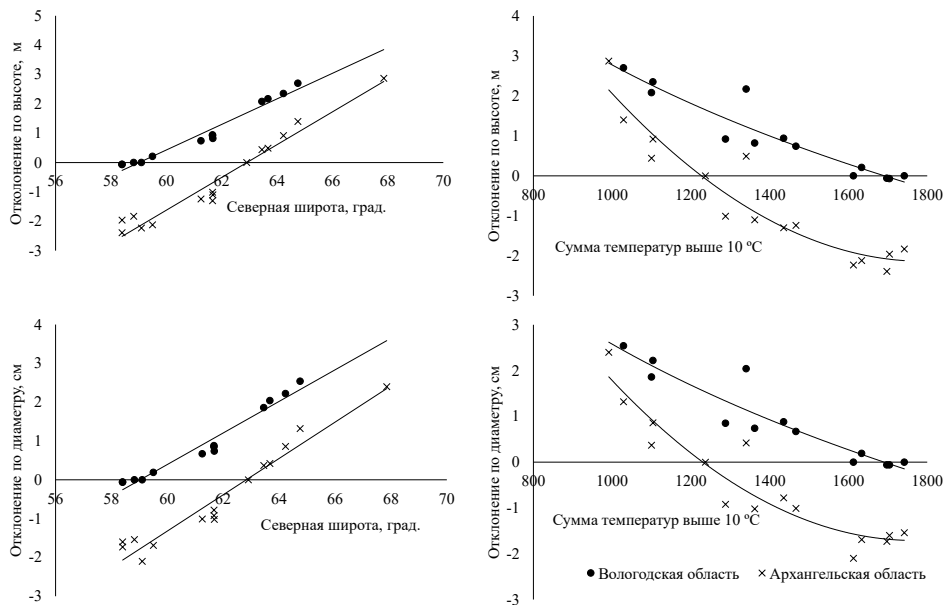


Рис. 3. Связь отклонений (разница между ростом климатипа в месте происхождения и в месте испытания) высоты и диаметра ели обыкновенной с северной широтой и суммой температур выше 10 °С в географических культурах Архангельской и Вологодской областей

Fig. 3. The relationship of deviations (difference between the provenance growth at the place of origin and the test site) of European spruce height and diameter with northern latitude and the sum of temperatures above 10 °C in the provenance plot in the Arkhangelsk and Vologda regions

В пределах пункта испытания абсолютная величина отклика по высоте и диаметру ели обыкновенной связана с удалением родины происхождения потомства от пункта испытания: чем более удалена родина исходного насаждения от пункта испытания, тем выше отклик на изменение условий. Местоположение пункта испытания оказывает влияние на рост климатипов ели обыкновенной: ее рост в условиях Вологодской области выше, при этом сохраняются закономерности, связанные с происхождением потомства. Сравнение реакции на изменение условий произрастания (потепление и похолодание) климатипов в разных пунктах испытания (Архангельская и Вологодская области) в пределах севера Русской равнины (в пределах колебаний 10° с. ш.) выявляет ту же закономерность, которую отмечали ранее в других регионах мира [15, 18, 19, 28]: более южные потомства из более теплых условий произрастания чувствительнее и их отклик на изменение условий роста в пункте испытания сильнее при имитации как потепления, так и похолодания.

Например, различия в отклике климатипов, родина исходных насаждений которых располагается южнее  $63^{\circ}$  с. ш., в разных пунктах испытания достигали 2 см по диаметру и 2,5 м по высоте. Климатипы, тяготеющие по географическому происхождению к высоким широтам, проявляют инертность и меньший отклик на изменение климата. Возможно, это связано с видовой дифференциацией ели обыкновенной. Северные происхождения чаще представлены елью сибирской (*Picea obovata* L.), расселившейся по территории современного ареала через Полярный Урал [11]. Данные происхождения ели отличаются меньшей фенотипической пластичностью [23].

Использование в анализе не значений роста абсолютных показателей, а значений отклонений между географическими и климатическими показателями в местах произрастания и испытания потомства позволяет объединить результаты различных пунктов испытания (рис. 4) и показать отклонения в росте на единицу отклонений в характеристиках, связанных с изменением условий произрастания, т. е. подойти к норме реакции [23] организма на среду.

Наблюдается прямая связь между откликом в росте и различиями показателей северной широты и суммы температур выше  $10^{\circ}\text{C}$  мест происхождения и произрастания климатипов ели ( $R^2 = 0,88\text{--}0,96$ ). Отклик в росте ели обыкновенной выше с увеличением расстояния перемещения потомства (в географическом отношении) и различий в сумме температур места происхождения климатипа и места испытания его потомства.

Используя уравнения (рис. 4) рассчитали норму реакции ели обыкновенной второго класса возраста по линейному и радиальному приростам на  $1^{\circ}$  отклонения по северной широте и на  $100^{\circ}\text{C}$  при изменении суммы температур выше  $10^{\circ}\text{C}$ . Похолодание или потепление климата, отраженное посредством суммы температур выше  $10^{\circ}\text{C}$ , при снижении или повышении суммы температур на каждые  $100^{\circ}\text{C}$  будет уменьшать или увеличивать высоту ели на Русской равнине на 0,48 м, диаметр – на 0,42 см. При перемещении потомства для лесовыращивания в южном или северном направлении высота ели обыкновенной второго класса возраста на каждый градус северной широты будет увеличиваться или уменьшаться в среднем на 0,5 м, диаметр – на 0,44 см.

### Заключение

Таким образом, по результатам изучения роста ряда климатипов *Picea abies* (L.) Karst.  $\times$  *P. obovata* (Ledeb.) в географических культурах севера Русской равнины (Архангельская и Вологодская области), сравнения фактических высоты и диаметра в местах произрастания (пункт испытания) и расчетной высоты в местах произрастания исходных насаждений показано наличие средней нормы реакции для породы. Для прогнозирования влияния потепления и похолодания различного уровня (отклонение от места испытания потомства) рассматривали сумму температур выше  $10^{\circ}\text{C}$ . Семена для лесовыращивания перебрасывали в координатах географической широты.

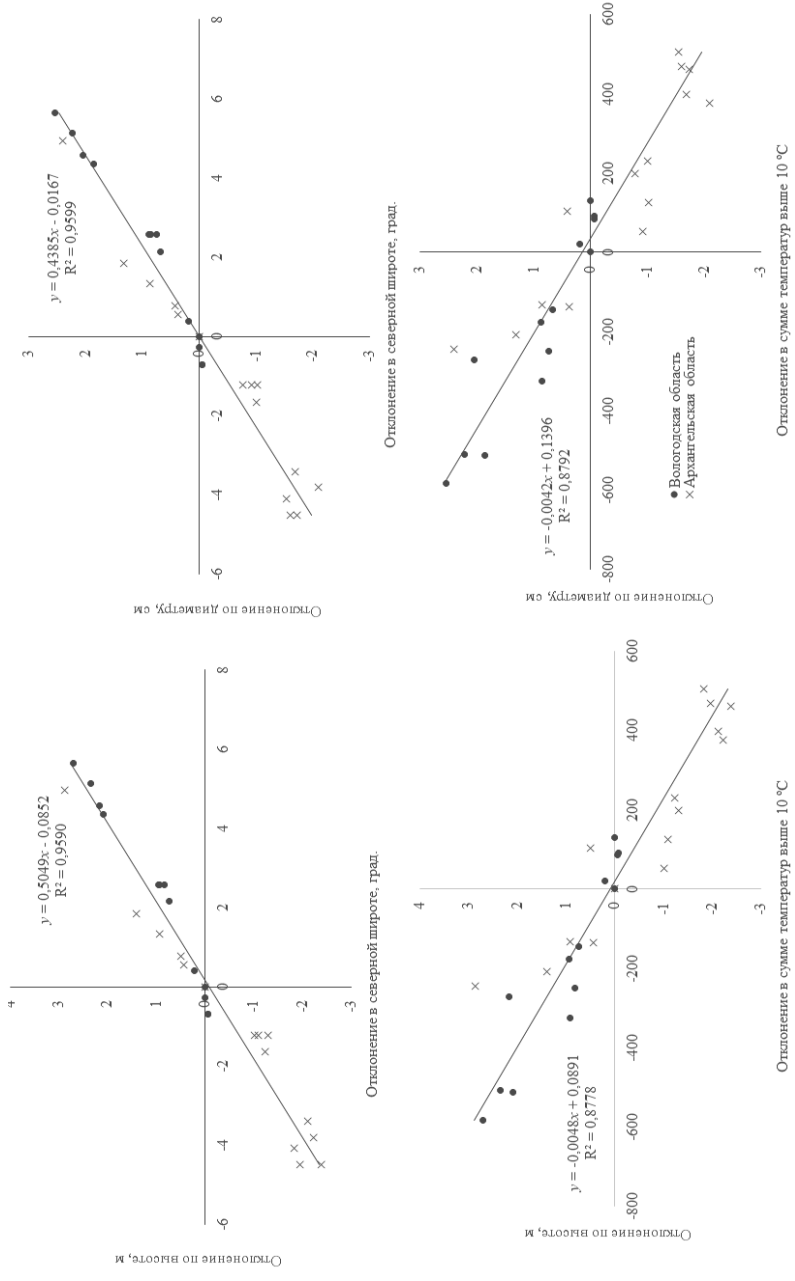


Рис. 4. Связь отклика по высоте и диаметру климатиков ели обыкновенной с изменениями северной широты и суммы температур выше 10 °С в местах происхождения и произрастания потомства

Fig. 4. The relationship of the response in height and diameter of European spruce provenances with changes in the northern latitude and the sum of temperatures above 10 °С between the place of origin and the place of progeny growth

Условия произрастания ели обыкновенной оказывают влияние на рост климатипов одного места происхождения. Потомства насаждений средней и южной подзоны тайги чувствительнее и проявляют больший отклик на изменение условий роста в пункте испытания по сравнению с потомствами северотаежных насаждений. Для изученных климатипов ели независимо от пункта испытания установлена прямая связь между откликом в росте и различиями показателей северной широты и суммы температур выше 10 °С мест происхождения и произрастания породы ( $R^2 = 0,88-0,96$ ). Чем больше расстояние перемещения потомства (в географическом отношении) и различия в сумме температур на родине происхождения климатипа и в месте испытания потомства, тем выше отклик в росте ели обыкновенной.

Ель реагирует примерно одинаковой величиной нормы реакции при перемещении потомства на одинаковую величину градиента (северная широта) к югу или северу и при изменении климатического фактора (сумма температур выше 10 °С) в сторону потепления или похолодания. Абсолютная величина отклика роста ели обыкновенной по высоте и диаметру в пределах севера Русской равнины, видимо, закреплена генетически и сформировалась при постепенной миграции елей сибирской и обыкновенной во время их расселения по Русской равнине. При изменении суммы температур выше 10 °С на каждые 100 °С разница в приросте по высоте и диаметру составит 0,48 м и 0,42 см соответственно. На каждый градус изменения северной широты отклик по высоте будет в среднем 0,50 м, по диаметру – 0,44 см. Для происхождений из подзоны северной тайги, преимущественно представленных елью сибирской (*P. obovata*), отклик реакции вида в 2 раза ниже, чем для происхождений ели гибридной *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) из подзоны средней тайги.

Рассчитанные величины отклика по высоте и диаметру ели обыкновенной необходимо учитывать при решении вопроса о переброске семян для лесовосстановления, использовать в прогнозах при разработке мероприятий лесного хозяйства, адаптированных к предстоящим климатическим изменениям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабушкина Е.А., Кнорре А.А., Ваганов Е.А., Брюханова М.В. Трансформация климатического отклика в радиальном приросте деревьев в зависимости от топоэкологических условий их произрастания // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 159–166.

Babushkina E.A., Knorre A.A., Vaganov E.A., Bryukhanova M.V. Transformation of Climatic Response in Radial Increment of Trees Depending on Topoecological Conditions of Their Occurrence. *Geography and Natural Resources*, 2011, no. 1, pp. 159–166. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1875372811010148>

2. Волосевич И.В. Закономерности широтной изменчивости роста древесной растительности в лесах Европейского Севера и их практическое использование // Лесоводственные исследования на зонально-типологической основе. Архангельск: АИЛиЛХ, 1984. С. 27–38.

Volosevich I.V. Patterns of Latitudinal Variability of Woody Vegetation Growth in the Forests of the European North and Their Practical Use. *Forestry Research on a Zonal-Typological Basis*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1984, pp. 27–38. (In Russ.).

3. Замолодчиков Д., Краев Г. Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4(48). С. 23–31.

Zamolodchikov D., Kraev G. Influence of Climate Change on Russian Forests: Recorded Impacts and Forecast Estimates. *Ustoychivoye lesopol'zovaniye*, 2016, no. 4(48), pp. 23–31. (In Russ.).

4. Изучение имеющихся и создание новых географических культур: (Программа и методика работ) / под ред. Е.П. Проказина. Пушкино: ВНИИЛМ, 1972. 52 с.

*Study of Existing and Creation of New Provenance Plots: (Program and Working Procedures)*. Ed. by E.P. Prokazin. Pushkino, VNIILM Publ., 1972. 52 p. (In Russ.).

5. Климат. Суммы активных температур выше 10° // Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их болезни, вредители и сорные растения. Режим доступа: [http://www.agroatlas.ru/ru/content/Climatic\\_maps/Sum\\_t/Sum\\_t10/index.html](http://www.agroatlas.ru/ru/content/Climatic_maps/Sum_t/Sum_t10/index.html) (дата обращения: 20.03.20).

Climate. Effective Heat Sums above 10 °C. *Interactive Agricultural Ecological Atlas of Russia and Neighboring Countries: Economic Plants and Their Diseases, Pests and Weeds*. (In Russ.).

6. Мат'яш Ч. Генетические и экологические ограничения адаптации // Лесная генетика, селекция и физиология древесных растений: материалы междунар. симп. (25–30 сент. 1989 г., Воронеж). М., 1989. С. 60–67.

Mat'yash Ch. Genetic and Ecological Restrictions of Adaptation. *Forest Genetics, Breeding and Physiology of Woody Plants: Proceedings of International Symposium (September 25–30, 1989, Voronezh)*. Moscow, 1989, pp. 60–67. (In Russ.).

7. Наквасина Е.Н. Географические культуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) как природная модель имитации климатических изменений // Вестн. Помор. ун-та. Сер.: Естеств. и точн. науки. 2003. № 2. С. 48–55.

Nakvasina E.N. Provenance Plots of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) as a Natural Model of Climate Change Simulation. *Vestnik Pomorskogo universiteta. Series "Natural Sciences"*, 2003, no. 2, pp. 48–55. (In Russ.).

8. Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А., Чупров А.В., Беляев В.В. Реакция роста сосны обыкновенной на климатические изменения в широтном градиенте // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 82–93.

Nakvasina E.N., Prozherina N.A., Chuprov A.V., Belyaev V.V. Growth Response of Scots Pine to Climate Change in the Latitudinal Gradient. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 5, pp. 82–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.82>

9. Наквасина Е.Н., Юдина О.А., Покатило А.В. Ростова и репродуктивная реакции *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) при имитации потепления климата // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2016. № 1. С. 89–96.

Nakvasina E.N., Yudina O.A., Pokatilo A.V. Growth and Reproductive Response of *Picea abies* (L.) Karst. × *P. obovata* (Ledeb.) in Climate Change Simulation. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Natural Sciences"*, 2016, no. 1, pp. 89–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2016.1.89>

10. Наквасина Е.Н., Юдина О.А., Прожерина Н.А., Камалова И.И., Минин Н.С. Географические культуры в ген-экологических исследованиях на Европейском Севере. Архангельск: АГТУ, 2008. 308 с.

Nakvasina E.N., Yudina O.A., Prozherina N.A., Kamalova I.I., Minin N.S. *Provenance Plots in Gene-Ecological Studies in the European North*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 308 p. (In Russ.).



11. Попов П.П. Ель европейская и сибирская: структура, интеграция и дифференциация популяционных систем. Новосибирск: Наука, 2005. 231 с.  
Popov P.P. *European and Siberian Spruce: Structure, Integration and Differentiation of Population Systems*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 231 p. (In Russ.).
12. Beaulieu J., Rainville A. Adaptation to Climate Change: Genetic Variation is Both a Short- and a Long-Term Solution. *The Forestry Chronicle*, 2005, vol. 81, no. 5, pp. 704–709. <https://doi.org/10.5558/tfc81704-5>
13. Beuker E., Koski V. Adaptation of Tree Populations to Climate as Reflected by Ages Provenance Tests. *Caring for the Forest: Research in a Changing World. Poster Abstracts. IUFRO XX World Congress, August 6–12, 1995*. Tampere, Finland, 1995, p. 248.
14. Čermák P., Rybníček M., Žid T., Andreassen K., Børja I., Kolář T. Impact of Climate Change on Growth Dynamics of Norway Spruce in South-Eastern Norway. *Silva Fennica*, 2017, vol. 51, no. 2, art. 1781. <https://doi.org/10.14214/sf.1781>
15. Hart J.L., van de Gevel S.L., Sakulich J., Grissino-Mayer H.D. Influence of Climate and Disturbance on the Growth of *Tsuga canadensis* at Its Southern Limit in Eastern North America. *Trees*, 2010, vol. 24, pp. 621–633. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00468-010-0432-y>
16. Huang J.-G., Bergeron Y., Berninger F., Zhai L., Tardif J.C., Denneler B. Impact of Future Climate on Radial Growth of Four Major Boreal Tree Species in the Eastern Canadian Boreal Forest. *PLoS ONE*, 2013, vol. 8, iss. 2, art. e56758. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056758>
17. Garzón M.B., Alía R., Robson T.M., Zavala M.A. Intra-Specific Variability and Plasticity Influence Potential Tree Species Distributions Under Climate Change. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, vol. 20, iss. 5, pp. 766–778. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00646.x>
18. Gömöry D., Longauer R., Hlásny T., Palacaj M., Strmeň S., Krajmerova D. Adaptation to Common Optimum in Different Populations of Norway Spruce (*Picea abies* Karst.). *European Journal of Forest Research*, 2012, vol. 131, pp. 401–411. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0512-6>
19. Kapeller S., Lexer M.J., Geburek T., Hiebl J., Schueler S. Intraspecific Variation in Climate Response of Norway Spruce in the Eastern Alpine Range: Selecting Appropriate Provenances for Future Climate. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 271, pp. 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.039>
20. Krajmerová D., Longauer R., Pacalaj M., Gömöry D. Influence of Provenance Transfer on the Growth and Survival of *Picea abies* Provenances. *Dendrobiology*, 2009, vol. 61, pp. 17–23.
21. Leites L.P., Robinson A.P., Rehfeldt G.E., Marshall J.D., Crookston N.L. Height-Growth Response to Climatic Changes Differs Among Populations of Douglas-Fir: A Novel Analysis of Historic Data. *Ecological Applications*, 2012, vol. 22, iss. 1, pp. 154–165. <https://doi.org/10.1890/11-0150.1>
22. Mátyás Cs. Modeling Effects of Climate Change with Provenance Test Data by Applying Ecological Distances. *Caring for the Forest: Research in a Changing World. Poster Abstracts. IUFRO XX World Congress, August 6–12, 1995*. Tampere, Finland, 1995, p. 250.
23. Nakvasina E., Demina N., Prozherina N., Demidova N. Assessment of Phenotypic Plasticity of Spruce Species *Picea abies* (L.) Karst. and *P. obovata* (Ledeb.) on Provenances Tests in European North of Russia. *Central European Forestry Journal*, 2019, vol. 65, iss. 2, pp. 121–128. <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0012>
24. Oleksyn J., Tjoelker M.G., Reich P.B. Adaptation to Changing Environment in Scots Pine Populations Across a Latitudinal Gradient. *Silva Fennica*, 1998, vol. 32(2), pp. 129–140. <https://doi.org/10.14214/sf.691>



25. Persson B. Will Climate Change Affect the Optimal Choice of *Pinus sylvestris* Provenances? *Silva Fennica*, 1998, vol. 32(2), pp. 121–128. <https://doi.org/10.14214/sf.690>

26. Rehfeldt G.E., Tcebakova N.M., Milyutin L.I., Parfenova E.I., Wykoff W.R., Kouzmina N.A. Assessing Population Responses to Climate in *Pinus sylvestris* and *Larix* spp. of Eurasia with Climate-Transfer Models. *Eurasian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 6, iss. 2, pp. 83–98.

27. Savolainen O., Bokma F., García-Gil R., Komulainen P., Repo T. Genetic Variation in Cessation of Growth and Frost Hardiness and Consequences for Adaptation of *Pinus sylvestris* to Climatic Changes. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 197, iss. 1-3, pp. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.006>

28. Suvanto S., Nöjd P., Henttonen H.M., Beuker E., Mäkinen H. Geographical Patterns in the Radial Growth Response of Norway Spruce Provenances to Climatic Variation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, vol. 222, pp. 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.003>

29. Taeger S., Zang C., Liesebach M., Schneck V., Menzel A. Impact of Climate and Drought Events on the Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Provenances. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 307, pp. 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.053>

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

Научная статья


УДК 502.2:574.3/9:581.1/5/9:582.475.2:631.811:630\*161.32:911.52

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-38-50

### Корневое питание, фотосинтез и чистая первичная продукция у древостоев рода *Picea* на уровне организма в пределах российского ареала

**В.М. Лебедев<sup>1</sup>**, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: M-8699-2019*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3316-854X>*

**Е.В. Лебедев<sup>1</sup>** , *д-р с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: G-9445-2019*,


*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6981>*

**В.Н. Сорокопудов<sup>2</sup>**, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: B-1520-2018*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0133-6919>*

**М.В. Ларионов<sup>3-6</sup>**, *д-р биол. наук, вед. науч. сотр., проф.*;

*ResearcherID: N-8885-2016*, *ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0834-2462>*

<sup>1</sup>Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; proximus39@mail.ru, proximus77@mail.ru 

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, ул. Грина, д. 7, Москва, Россия, 117216; sorokopud2301@mail.ru

<sup>3</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, д. 49, Москва, Россия, 127550; m.larionow2014@yandex.ru

<sup>4</sup>Российский государственный социальный университет, ул. Вильгельма Пика, д. 4, стр. 1, Москва, Россия, 129226

<sup>5</sup>Государственный университет управления, Рязанский просп., д. 99, Москва, Россия, 109542

<sup>6</sup>Государственный университет по землеустройству, ул. Казакова, д. 15, Москва, Россия, 105064

Поступила в редакцию 19.02.21 / Одобрена после рецензирования 24.05.21 / Принята к печати 26.05.21

**Аннотация.** Проведен комплексный ретроспективный эколого-физиологический анализ табличных показателей сухой массы древостоев рода *Picea*, произраставших от Северо-Запада до Дальнего Востока России. Эколого-физиологические показатели рассчитаны на один организм (условное дерево средней массы). Биологическую продуктивность устанавливали по относительному повышению средней сухой массы дерева в смежных возрастных периодах. Количественные данные минеральной продуктивности определяли по методу В.М. Лебедева, чистой продуктивности фотосинтеза – по А.А. Ничипоровичу на уровне организма в древостоях каждого возрастного периода в диапазоне от 10–30 до 120–210 лет. Во всех регионах отмечено снижение с возрастом дерева поглощения N в 14,9–93,7; P – в 18,7–119,9 и K – в 15,4–134,4 раза. Резкое уменьшение поглощения элементов продолжалось до 50–60-летнего возраста, после чего стабилизировалось на крайне низком уровне. Ухудшение поглотительной деятельности корней привело к падению чистой продуктивности фотосинтеза и биологической продуктивности в 2,88–14,0 и 1,64–2,60 раза соответственно. Связь поглощения N, P и K с чистой продуктивностью фотосинтеза и биологической продуктивностью во всех зонах была высокой положительной. Различия в пределах России в насаждениях 30, 60, 90 и 120 лет величины чистой первичной продукции достигли 5,0, 4,7, 4,6 и 5,2 раза со-

© Лебедев В.М., Лебедев Е.В., Сорокопудов В.Н., Ларионов М.В., 2023



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

ответственно, а чистой минеральной продуктивности по азоту – 4,0, 4,3, 4,8 и 4,6 раза соответственно. Связь между этими двумя показателями характеризовалась как высокая положительная. Во всех регионах связь между количеством поглощенного корнями ели азота и эффективностью его использования при формировании единицы биомассы была высокой отрицательной. Лучшими регионами для произрастания растений ели оказались центр Русской равнины и Среднее Поволжье, а худшими – Красноярский и Хабаровский (север) края.

**Ключевые слова:** *Picea*, сухая масса древостоев, минеральное питание, фотосинтез, чистая первичная продукция, уровень организма, онтогенез, ареал ели в России

**Благодарность:** Работа подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в соответствии с соглашением № 075–15-2020-905 от 16 ноября 2020 г. о предоставлении гранта в виде субсидий из федерального бюджета РФ. Грант был предоставлен для государственной поддержки создания и развития Научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего» РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева.

**Для цитирования:** Лебедев В.М., Лебедев Е.В., Сорокопудов В.Н., Ларионов М.В. Корневое питание, фотосинтез и чистая первичная продукция у древостоев рода *Picea* на уровне организма в пределах российского ареала // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 38–50. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-38-50>

Original article

## Root Nutrition, Photosynthesis, and Net Primary Production in Tree Stands of the genus *Picea* at the Organism Level within the Range in Russia

**Valentin M. Lebedev**<sup>1</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8699-2019](https://orcid.org/0000-0003-3316-854X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3316-854X>

**Evgenij V. Lebedev**<sup>2</sup>, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-9445-2019](https://orcid.org/0000-0002-5824-6981),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6981>

**Vladimir N. Sorokopudov**<sup>2</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [B-1520-2018](https://orcid.org/0000-0002-0133-6919),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0133-6919>

**Maxim V. Larionov**<sup>3-6</sup>, Doctor of Biology, Leading Research Scientist, Prof.;

ResearcherID: [N-8885-2016](https://orcid.org/0000-0003-0834-2462), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0834-2462>

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; [proximus39@mail.ru](mailto:proximus39@mail.ru), [proximus77@mail.ru](mailto:proximus77@mail.ru)

<sup>2</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, ul. Grina, 7, Moscow, 117216, Russian Federation; [sorokopud2301@mail.ru](mailto:sorokopud2301@mail.ru)

<sup>3</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya, 49, Moscow, 127550, Russian Federation; [m.larionow2014@yandex.ru](mailto:m.larionow2014@yandex.ru)

<sup>4</sup>Russian State Social University, ul. Vil'gel'ma Pika, 4, str. 1, Moscow, 129226, Russian Federation

<sup>5</sup>State University of Management, Ryazanskiy prosp., 99, Moscow, 109542, Russian Federation

<sup>6</sup>State University of Land Use Planning, ul. Kazakova, 15, Moscow, 105064, Russian Federation

Received on February 19, 2021 / Approved after reviewing on May 24, 2021 / Accepted on May 26, 2021



This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

**Abstract.** A complex retrospective ecological and physiological analysis of the tabular data on the dry weight of stands of the genus *Picea* growing from the Northwest to the Russian Far East was carried out. Ecological and physiological indicators are calculated per an organism (conditional tree of average weight). Biological productivity (BP, times) was determined by the relative increase in the average dry weight of a tree in adjacent age periods. Quantitative data of mineral productivity (MP, mg/m<sup>2</sup>/per day) were found by the method of V.M. Lebedev, and the net productivity of photosynthesis (NPPh, g/m<sup>2</sup>/per day) was calculated according to A.A. Nichiporovich at the organism level in stands of each age period in the range from 10–30 to 120–210 years. In all regions, there was a decrease in the element uptake by trees with age: nitrogen (N) by 14.9–93.7, phosphorus (P) by 18.7–119.9 and potassium (K) by 15.4–134.4 times. A sharp decrease in the element uptake continued until the age of 50–60 years, after which it stabilized at an extremely low level. The decline in the root uptake activity resulted in a 2.88–14.0 and 1.64–2.60-fold drop in NPPh and BP, respectively. The correlation between N, P and K uptake with NPPH and BP was highly positive in all zones. Within Russia in 30, 60, 90, and 120-year-old stands differences in the values of net primary production (NPP, g/m<sup>2</sup> of nutrition area) reached 5.0, 4.7, 4.6, and 5.2 times, respectively, and net mineral productivity by nitrogen (NMP(N), g/m<sup>2</sup> of nutrition area) reached 4.0, 4.3, 4.8, and 4.6 times, respectively. The correlation between these two indicators was described as highly positive. The correlation between the amount of nitrogen uptaken by spruce roots and the efficiency of its use in forming a unit of biomass was highly negative in all regions. The center of the Russian Plain and the Middle Volga region were the best regions for the growth of spruce plants, while the Krasnoyarsk and Khabarovsk (north) Krai were the worst.

**Keywords:** *Picea*, dry weight of stands, mineral nutrition, photosynthesis, net primary production, organism level, ontogenesis, Russia

**Acknowledgments:** The article was prepared with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in accordance with the agreement No. 075-15-2020-905 of November 16, 2020 on providing a grant in the form of subsidies from the federal budget of the Russian Federation. The grant was provided for state support for the creation and development of the World-class Scientific Center “Agrotechnologies for the Future”.

**For citation:** Lebedev V.M., Lebedev E.V., Sorokopudov V.N., Larionov M.V. Root Nutrition, Photosynthesis, and Net Primary Production in Tree Stands of the Genus *Picea* at the Organism Level Within the Range in Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 38–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-38-50>

### Введение

Древостои рода *Picea* занимают значительные площади лесов в мире [28–32, 36], в том числе в европейской и азиатской частях России [22]. Биологическая продуктивность таких древостоев изучалась в основном таксационными методами [1, 4, 11, 16, 24, 35] с затрагиванием преимущественно надземной части, и лишь немногие ученые [3, 14, 15] уделяли внимание морфологическим и эколого-физиологическим сторонам жизнедеятельности корневой системы. Для повышения результативности модельных и прогностических оценок продуктивности лесов необходимы количественные характеристики функционирования листового аппарата и показатели чистой первичной продукции (ЧПП) для каждого лесобразующего вида в разных климатических зонах [17, 21–23, 25, 27, 33, 34]. Современные методы изучения биологической продуктивности лесных фитоценозов не позволяют выходить на уровень организма как целостной системы вследствие крайней сложности решаемой задачи.

С публикацией В.А. Усольцевым [22] таблиц сухих фитомасс древостоев Евразии с фрагментацией на стволы, ветви, хвою и корни появилась возможность провести комплексный эколого-физиологический анализ сухих фитомасс с целью преобразования таксационных табличных данных в количественные показатели функционирования корневой системы, листового аппарата и биологической продуктивности растений на уровне организма в различные возрастные периоды. Для этого необходимо применять экологические, физиологические, агрохимические и балансовые методы исследования, а также знать результаты балансовых опытов с елью [12, 13] и климатические данные мест ее произрастания [6, 8].

Цель работы – путем ретроспективного эколого-физиологического преобразования табличных данных сухих масс ельников, произрастающих от Северо-Запада до Дальнего Востока России, получить на уровне организма количественные физиологические показатели реакции корневой системы и листового аппарата на лесорастительные условия в различные возрастные периоды и выделить зоны с повышенной продуктивностью растений.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектом исследования служили табличные данные сухих масс древостоев вида *Picea*, произраставших от Северо-Запада до Дальнего Востока России [6, 8, 22] (табл. 1). Все эколого-физиологические показатели рассчитаны на один организм (дерево средней массы, весовые параметры хвои, стволов, сучьев и корней которого определялись делением их общей фитомассы на количество экземпляров, приходящихся на 1 га в каждом возрастном интервале) [14]. Поверхность хвои устанавливали с учетом высокой стабильности ее геометрических показателей в пределах исследуемой части ареала [2, 19]. Чистую продуктивность фотосинтеза (ЧПФ, г/м<sup>2</sup>/день), активную поверхность корней, минеральную по N, P и K (МП, мг/м<sup>2</sup>/день) и биологическую (БП, г/м<sup>2</sup>/день) продуктивность рассчитывали за каждый сравниваемый период [10–12, 18] с учетом длительности вегетации (безморозный период) [35], высокой стабильности морфологических показателей поглощающих корней модулярного организма [12, 14, 16, 26] и концентрации минеральных элементов в фитомассе растений одного вида [5, 7, 9, 20]. ЧПП, г/м<sup>2</sup>, определяли расчетным путем как произведение ЧПФ на число безморозных дней и величину листового индекса (отношение поверхности хвои дерева к площади его питания) и относили к площади питания растения. Чистую минеральную продуктивность по N, P и K (ЧМП, г/м<sup>2</sup> площади питания) рассчитывали умножением МП по элементу на длительность безморозного периода и корневой индекс (отношение поверхности активных корней дерева к площади его питания). Статистическую обработку полученных данных проводили методами корреляционного и регрессионного анализа.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

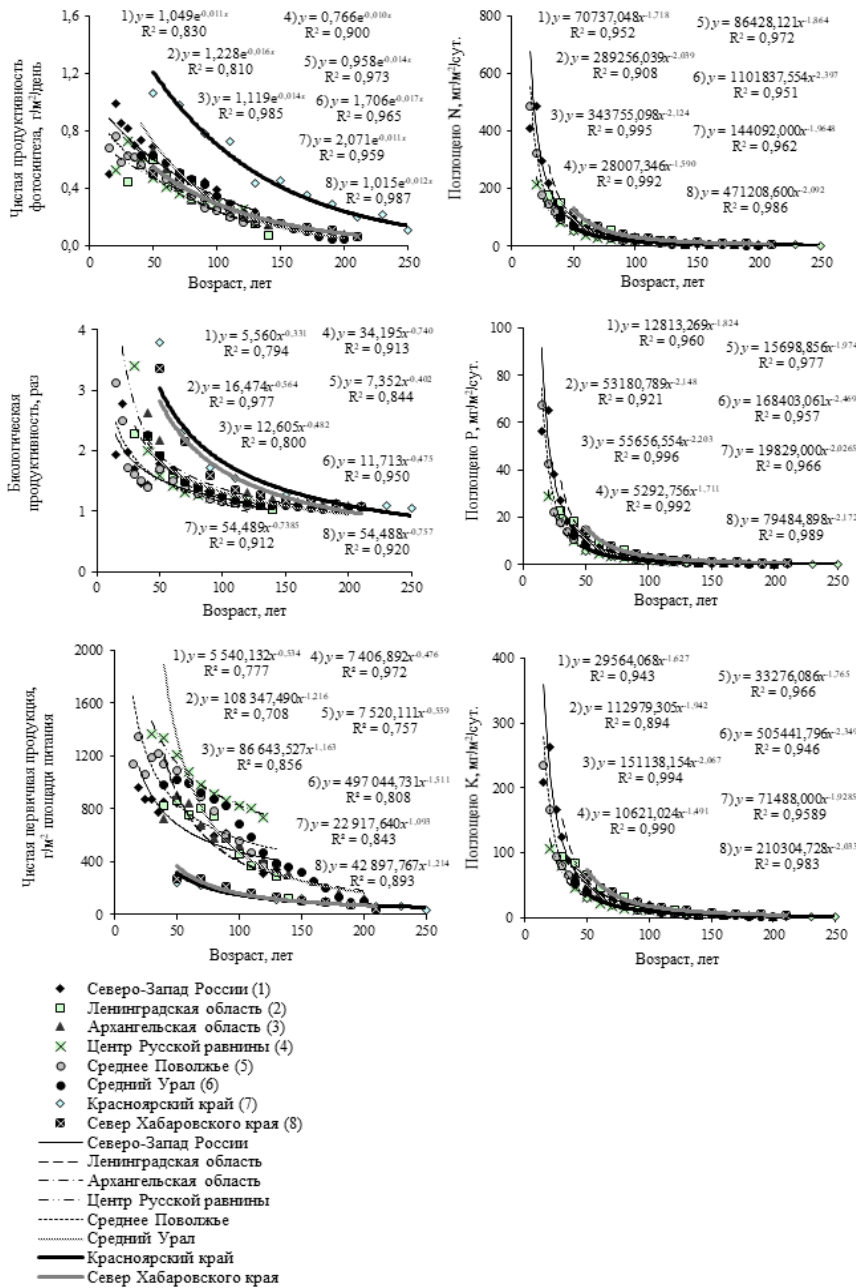
Результаты расчетов показали, что во всех регионах у растений ели за наблюдаемый период онтогенеза снижались ЧПФ, ЧПП и БП в 2,88–14,00; 2,02–5,60 и 1,64–2,60 раза соответственно. Снижалось и поглощение элементов минерального питания: азота (в 14,0–93,7 раза), фосфора (в 18,7–119,9 раза) и калия (в 15,4–134,4 раза). Динамика показателей приведена на рисунке, на котором отражены существенное уменьшение показателей к 80–100 годам и дальнейшее их пологое снижение.

Таблица 1

Исследуемые виды рода *Picea* и характеристика мест их произрастания [6, 8, 22]  
 Studied species of the genus *Picea* and characteristics of their habitats [6, 8, 22]

Регион	Вид	Класс бонитета	Продолжительность безморозного периода, сут.	Возраст, лет	Тип почвы	Климат
Северо-Запад РФ	<i>P. abies</i> L.	II	120	10–130	Подзолистые	От морского до умеренно континентального
Ленинградская область		I		30–140		
Архангельская область	<i>Picea abies</i> (L.) Karst. × <i>P. obovata</i> (Ledeb.).	II	130	30–200	Дерново-подзолистые	Умеренно континентальный
Центр Русской равнины	<i>P. abies</i> L.	Ia		10–120		
Среднее Поволжье		I	10–130			
Средний Урал	<i>P. obovata</i> Ledeb.	II	120	30–200	Подзолистые	Континентальный
Красноярский край				Мерзлотно-таежные	Резко континентальный	
Север Хабаровского края	<i>P. obovata</i> Ledeb.	IV	100	30–190	Дерново-подзолистые	Умеренный муссонный





Чистая продуктивность фотосинтеза, биологическая продуктивность, чистая первичная продукция и поглощение N, P и K растениями рода *Picea* на уровне организма в онтогенезе

NPP<sub>Ph</sub>, BP, NPP and uptake of N, P and K by plants of the genus *Picea* at the organism level in ontogenesis

Связь ЧПП с возрастом характеризовалась высокой отрицательной корреляцией (от -0,766 до -0,872). Между ЧПП и ЧПФ связь варьировала от средней до высокой положительной (от 0,653 до 0,995). Связь ЧПП с БП и поглощением азота была средней и высокой положительной – соответственно от 0,701 до 0,847 и от 0,500 до 0,991. Характер взаимосвязи ЧПФ и МП, а также отношение



корневого потенциала к фотосинтетическому подробно отражены в работе [14]. Связь МП с ЧПФ и БП во всех регионах была высокой положительной.

Изменение показателей в онтогенезе имело сходные тенденции, однако для каждого региона прослеживалась своя специфика. Поэтому в табл. 2 мы представили данные, установленные в контрастных условиях произрастания в возрастные периоды с интервалом 30 лет: 30, 60, 90 и 120 лет.

В возрасте 30 лет поглощение азота деревьями составило 52–317 мг/м<sup>2</sup>/сут. Различия в ЧПФ по регионам были 3,1 раза и достигли максимума у ели в условиях Красноярского края и Северо-Запада – 1,41 и 0,82 г/м<sup>2</sup>/день соответственно. В других регионах показатель колебался от 0,45 до 0,73 г/м<sup>2</sup>/день. Высокие значения ЧПП наблюдались в центре Русской равнины, Среднем Поволжье, на Среднем Урале и Северо-Западе – 1376, 1177, 923 и 876 г/м<sup>2</sup> площади питания растений соответственно. Самые низкие – в Красноярском и Хабаровском краях – соответственно 338 и 276 г/м<sup>2</sup>. ЧПП в пределах выбранных регионов различалась в 5 раз. Поглощение азота за вегетацию в расчете на единицу площади питания было максимальным в центре Русской равнины (6,5 г/м<sup>2</sup>) и в Среднем Поволжье (5,3 г/м<sup>2</sup>), а минимальным – в Хабаровском крае (1,6 г/м<sup>2</sup>). Различия по регионам в 4 раза.

Поглощение азота елью в 60-летнем возрасте было на уровне от 39 до 91 мг/м<sup>2</sup>/сут. Разница по этому показателю составила между регионами 2,5 раза. Пониженные значения ЧПФ находились в интервале от 0,41 до 1,02 г/м<sup>2</sup>/день, различаясь по регионам в 2,4 раза. Высокое накопление биомассы сохранилось в центре Русской равнины (1087 г/м<sup>2</sup>), Среднем Поволжье (1008 г/м<sup>2</sup>) и на Среднем Урале (995 г/м<sup>2</sup>). Значения ЧПП по регионам различались в 4,7 раза. ЧМП(N) – в 4,3 раза. Последний показатель резко снижался в Красноярском и Хабаровском краях – до 0,9 и 1,3 г/м<sup>2</sup>. Более высокая ЧМП(N) наблюдалась в центре Русской равнины и в Среднем Поволжье – соответственно 3,9 и 3,7 г/м<sup>2</sup>.

При достижении древостоями возраста 90 лет растения поглощали азота от 21 до 41 мг/м<sup>2</sup>/сут. По сравнению с 60-летним возрастом значения ЧПФ были снижены. Разница между регионами по этому показателю составила 2,9 раза. Высокое накопление биомассы сохранилось на Среднем Урале (805 г/м<sup>2</sup>) и в центре Русской равнины (860 г/м<sup>2</sup>). По регионам значения ЧПП различались в 4,6 раза. При этом наблюдались незначительные изменения поглощения азота. Однако в Красноярском и Хабаровском краях показатель резко снизился до 0,6 и 0,8 г/м<sup>2</sup> соответственно. Поглощение азота растениями ели по регионам различалось в 4,8 раза.

В 120-летних древостоях зафиксировано поглощение азота от 11 до 23 мг/м<sup>2</sup>/сут. ЧПФ наблюдалась в диапазоне от 0,16 до 0,25 г/м<sup>2</sup>/день. В условиях Красноярского края, как и в более раннем возрасте, ЧПФ была повышенной (0,58 г/м<sup>2</sup>/день). Повышенные показатели фотосинтетической активности у растений ели сибирской в Красноярском крае (Прибайкалье) отмечены и в работе Г.Г. Суворовой [30]. Самые большие значения ЧПП обнаружены в центре Русской равнины (728 г/м<sup>2</sup>) и на Среднем Урале (469 г/м<sup>2</sup>), а низкие – в Красноярском и Хабаровском краях – соответственно 139 и 152 г/м<sup>2</sup>. Варьирование ЧПП по регионам составило 5,2 раза. Максимальная ЧМП(N) наблюдалась в центре Русской равнины (2,3 г/м<sup>2</sup>), а минимальная – в Красноярском и Хабаровском краях – соответственно 0,5 и 0,6 г/м<sup>2</sup>. Различия между регионами по количеству поглощенного азота были в 4,6 раза. Лучшими регионами для произрастания растений ели являлись центр Русской равнины и Среднее Поволжье.

Таблица 2

Чистая продуктивность фотосинтеза, поглощение азота, чистая первичная продукция, чистая минеральная продуктивность по азоту и эффективность формирования биомассы на единицу массы поглощенного азота (ЧПП/ЧМП(N)) у ели в пределах российского ареала в возрастах от 30 до 120 лет

**NPP<sub>ph</sub>, uptake of N, NPP, NMP(N) and the efficiency of biomass formation per uptaken nitrogen mass unit (NPP/NMP(N)) in spruce within its Russian range at the age from 30 to 120 years**

Регион	30 лет				60 лет				90 лет				120 лет				
	ЧПФ, г/м <sup>2</sup> / день	МП (N), мг/м <sup>2</sup> / сут.	ЧМП (N)		ЧПФ, г/м <sup>2</sup> / день	МП (N), мг/м <sup>2</sup> / сут.	ЧМП (N)		ЧПФ, г/м <sup>2</sup> / день	МП (N), мг/м <sup>2</sup> / сут.	ЧМП (N)		ЧПФ, г/м <sup>2</sup> / день	МП (N), мг/м <sup>2</sup> / сут.	ЧМП (N)		
			г/м <sup>2</sup> площади питания	г/г			г/м <sup>2</sup> площади питания	г/г			г/м <sup>2</sup> площади питания	г/г			г/м <sup>2</sup> площадь- ди питания	г/г	
Северо-Запад РФ	0,82	317	876	3,9	225	72	744	2,7	276	40	621	2,1	296	16	308	1,0	308
Ленинградская область	0,45	176	610	3,2	191	77	753	2,8	269	37	568	2,0	284	19	388	1,2	323
Архангельская область	0,64	121	607	2,2	276	61	840	3,3	255	26	586	2,1	279	14	398	1,4	284
Центр Русской равнины	0,73	152	1376	6,5	212	39	1087	3,9	279	21	860	2,9	297	14	728	2,3	317
Среднее Поволжье	0,62	145	1177	5,3	222	52	1008	3,7	272	21	612	2,0	306	11	374	1,2	312
Средний Урал	0,62	101	923	3,0	308	59	995	3,8	262	30	805	2,8	288	13	469	1,5	313
Красноярский край	1,41	52	338	2,9	117	43	233	0,9	259	22	186	0,6	310	14	139	0,5	278
Север Хабаровского края	0,69	114	276	1,6	173	91	274	1,3	211	41	214	0,8	268	23	152	0,6	253

Связь между величинами ЧПП и ЧМП(N) на 1 м<sup>2</sup> площади питания растения была на уровне  $r = 0,905, 0,995, 0,998$  и  $0,996$  для растений в 30, 60, 90 и 120 лет соответственно.

Представленные в табл. 2 количественные показатели ЧПП и ЧМП(N) в расчете на единицу площади питания деревьев позволяют установить эффективность использования поглощенного азота при формировании растениями ели биомассы в разные возрастные периоды. В 30, 60, 90 и 120-летнем возрасте растения ели на 1 г поглощенного азота сформировали от 117 до 308 (среднее – 216), от 211 до 279 (среднее – 260), от 268 до 310 (среднее – 291) и от 253 до 323 г (среднее – 299 г/г) биомассы соответственно. Коэффициент вариации приведенных величин был равен 27,4; 8,3; 4,1; 8,1 %.

На значительное варьирование (27,4 %) эффективности использования поглощенного азота растениями ели при формировании биомассы в 30-летнем возрасте могли повлиять различия в уровне плодородия почвы. В 60, 90 и 120-летних возрастах при снижении во всех регионах плодородия почвы до крайне низкого уровня, варьирование количества сформированной биомассы, приходящейся на 1 г поглощенного азота, резко сократилось. Следовательно, в режиме жесткого снижения азотного питания эффективность его использования при формировании биомассы была повышена. В пределах регионов связь между количеством поглощенного азота корнями ели и эффективностью его использования при формировании биомассы характеризовалась как высокая отрицательная ( $r = -0,964$ ). При снижении поглотительной деятельности корней активизируется неспецифическая адаптивная реакция, направленная на увеличение корневого потенциала к фотосинтетическому для поддержания работы листового аппарата и стабилизации биологической продуктивности растения. Обменные процессы в пределах организма переводятся в режим более эффективного использования азота при формировании биомассы для сохранения гомеостатического равновесия в биологической системе.

### *Выводы*

1. Получены количественные показатели деятельности корневой системы (чистая минеральная продуктивность), листового аппарата (чистая продуктивность фотосинтеза) и чистой первичной продукции в онтогенезе у древостоев ели в возрастном периоде от 10–30 до 120–210 лет в европейской и азиатской частях России. Во всех регионах отмечено снижение поглощения N в 14,9–93,7; P – в 18,7–119,9 и K в 15,4–134,4 раза.

2. Резкое снижение поглощения элементов продолжалось до 50–60 летнего возраста, после чего стабилизировалось на крайне низком уровне. Это приводило к падению чистой продуктивности фотосинтеза и биологической продуктивности в 2,88–14,0 и 1,64–2,60 раза соответственно. Связь минеральной продуктивности с этими показателями во всех регионах была высокой положительной.

3. Связь между величинами чистой первичной продукции и чистой минеральной продуктивности по азоту в 30, 60, 90 и 120-летнем возрасте была на уровне  $r = 0,905, 0,995, 0,998$  и  $0,996$  соответственно. Лучшими регионами для произрастания растений ели являлись центр Русской равнины и Среднее Поволжье, а худшими – Красноярский край и север Хабаровского края.

4. Полученные ретроспективным эколого-физиологическим методом количественные данные чистой первичной продукции важны для повышения результативности модельных и прогностических оценок карбоновой продуктивности лесных фитоценозов, имеющих важное экологическое и государственное значение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д., Евдокимов И.В. Фитомасса культур сосны и ели в Европейской части России. Архангельск, 2004. 112 с.

Babich N.A., Merzlenko M.D., Evdokimov I.V. *Phytomass of Pine and Spruce Crops in the European Part of Russia*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2004. 112 p. (In Russ.).

2. Бессчётнов В.П., Лебедев Е.В. Фотосинтез и биологическая продуктивность лесобразующих пород Волго-Вятского региона // Актуальные проблемы лесного хозяйства и рациональное использование ресурсов Нижегородской области. Н. Новгород: НГСХА, 2002. С. 107–116.

Besschetnov V.P., Lebedev E.V. Photosynthesis and Biological Productivity of Forest-Forming Species of the Volga-Vyatka Region. *Actual Problems of Forestry and Rational Use of Resources of the Nizhny Novgorod Region*. Nizhny Novgorod, NNSAA Publ., 2002, pp. 107–116. (In Russ.).

3. Блинов И.К., Асютин П.Ф. Закономерности пространственного распределения корневых систем ели и сосны в высокопродуктивных хвойных лесах БССР // Лесоведение и лесное хозяйство. Минск: Высш. шк. 1983. Вып. 18. С. 11–17.

Blintsov I.K., Asyutin P.F. Patterns of Spatial Distribution of Spruce and Pine Root Systems in Highly Productive Coniferous Forests of the BSSR. *Lesovedeniye i lesnoye khozyaystvo*, 1983, iss. 18, pp. 11–17. (In Russ.).

4. Вараксин Г.С., Поляков В.И., Люминарская М.А. Биологическая продуктивность еловых культур в Средней Сибири // Лесная таксация и лесоустройство. 2006. № 1(36). С. 24–28.

Varaksin G.S., Polyakov V.I., Lyuminarskaya M.A. Biological Productivity of Spruce Crops in Central Siberia. *Lesnaya taksatsiya i lesoustroystvo*, 2006, no. 1(36), pp. 24–28. (In Russ.).

5. Вахмистров Д.Б., Воронцов В.А. Избирательная способность растений не направлена на обеспечение их максимального роста // Физиология растений. 1997. Т. 44, № 3. С. 404–412.

Vakhmistrov D.B., Vorontsov V.A. Plant Selectivity is not Aimed at Maximizing Plant Growth. *Fiziologiya rastenij = Russian Journal of Plant Physiology*, 1997, vol. 44, no. 3, pp. 404–412. (In Russ.).

6. Географический энциклопедический словарь: Географические названия. М.: Сов. энцикл., 1983. 528 с.

*Geographical Encyclopedic Dictionary: Geographical Names*. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1983. 528 p. (In Russ.).

7. Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Транспорт, распределение и потребление <sup>14</sup>C-ассимилятов у сосны и ели в северотаежных фитоценозах при различном световом и азотном питании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 77–94.

Konovalov V.N., Zarubina L.V. Transport, Distribution and Consumption of Pine and Spruce <sup>14</sup>C-Assimilates in Northern Phytocenoses Under Different Illumination and Nitrogen Nutrition. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 4, pp. 77–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-77-94>

8. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с.

Kurnaev S.F. *Plant Zoning of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 203 p. (In Russ.).

9. Лавриченко В.М. Соотношение элементов питания в растениях как видовое генотипическое понятие // Вестн. с.-х. науки. 1971. № 7. С. 129–134.

Lavrichenko V.M. The Ratio of Nutrients in Plants as a Species Genotypic Concept. *Vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 1971, no. 7, pp. 129–134. (In Russ.).

10. Лебедев В.М. Определение активной поверхности и минеральной продуктивности корневой системы плодовых и ягодных культур // Методика исследования и вариационная статистика в научном плодоводстве: сб. докл. междунар. науч.-практ. конф., 25–26 марта 1998 г. Мичуринск: МГСХА, 1998. Т. 2. С. 39–42.

Lebedev V.M. Determination of the Active Surface and Mineral Productivity of the Root System of Fruit and Berry Crops. *Methods of Research and Variation Statistics in Scientific Fruit Growing: Proceedings of the International Scientific Practical Conference, Michurinsk, March 25–26 1998*. Vol. 2. Michurinsk, MSAА Publ., 1998, pp. 39–42. (In Russ.).

11. Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Сравнительное определение продуктивности лесных пород // Нетрадиционные и редкие растения, природные соединения и перспективы их использования: VII Междунар. симп., 24–27 мая 2006 г. Белгород: Политерра, 2006. Т. 1. С. 213–216.

Lebedev V.M., Lebedev E.V. Comparative Determination of the Forest Species Productivity. *Unconventional and Rare Plants, Natural Compounds and Prospects for Their Use: Proceedings of the International Symposium*. Belgorod, Politerra Publ., 2006, vol. 1, pp. 213–216. (In Russ.).

12. Лебедев В.М., Лебедев Е.В. Морфологические, функциональные и физиологические особенности активной части корневой системы лесобразующих пород Волго-Вятского региона // Агрехимия. 2011. № 4. С. 38–44.

Lebedev V.M., Lebedev E.V. Morphological, Functional, and Physiological Features of Active Roots of Forest-Forming Species in the Volga-Vyatka Region. *Agrohimia = Agricultural Chemistry*, 2011, no. 4, pp. 38–44. (In Russ.).

13. Лебедев Е.В. Влияние густоты насаждения на минеральное питание и биологическую продуктивность ели европейской в ее онтогенезе // Изв. Оренбург. ГАУ. 2012. № 6(38). С. 34–38.

Lebedev E.V. Influence of Tree Stand Density on Mineral Nutrition and Biological Productivity of Norway Spruce in Its Ontogenesis. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2012, no. 6(38), pp. 34–38. (In Russ.).

14. Лебедев Е.В. Биологическая продуктивность и минеральное питание ели европейской в онтогенезе в условиях Северной Европы // Изв. СПбЛТА. 2012. Вып. 199. С. 4–13.

Lebedev E.V. Biological Productivity and Mineral Nutrition of Spruce in the Ontogeny in Northern Europe. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii*, 2012, iss. 199, pp. 4–13. (In Russ.).

15. Мерзленко М.Д., Шестакова Е.Ю. Биологическая продуктивность искусственных молодняков ели // Науч. тр. МГУЛ. 1992. Вып. 257. С. 38–45.

Merzlenko M.D., Shestakova E.Yu. Biological Productivity of Artificial Spruce Young Stands. *Nauchnyye trudy MGUL*, 1992, iss. 257, pp. 38–45. (In Russ.).

16. Муромцев И.А. Активная часть корневой системы плодовых растений. М.: Колос, 1969. 247 с.

Muromtsev I.A. *The Active Part of the Root System of Fruit Plants*. Moscow, Kolos Publ., 1969. 247 p. (In Russ.).

17. Наквасина Е.Н., Демина Н.А. Экологическая стабильность географических рас ели обыкновенной // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2014. № 2. С. 61–70.

Nakvasina E.N., Demina N.A. Ecological Stability of Geographical Races of Spruce. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Natural Sciences"*, 2014, no. 2, pp. 61–70. (In Russ.).



18. Ничипорович А.А. О методах учета и изучения фотосинтеза как фактора урожайности // Тр. ИФР АН СССР. 1955. Т. 10. С. 210–249.

Nichiporovich A.A. On the Methods of Recording and Studying Photosynthesis as a Yield Factor. *Trudy Instituta Fiziologii Rasteniy AN SSSR*, 1955, vol. 10, pp. 210–249. (In Russ.).

19. Потемкин О.Н., Рудиковский А.В., Потемкина О.В. Полиморфизм морфологических характеристик елей подрода *Picea* (*Pinaceae*) в восточных районах обитания // Растительный мир Азиатской России. 2012. № 2(10). С. 19–26.

Potemkin O.N., Rudikovskiy A.V., Potemkina O.V. Polymorphism of Morphological Characteristics of the Subgenus *Picea* (*Pinaceae*) in the Eastern Regions of Habitation. *Flora and Vegetation of Asian Russia*, 2012, no. 2(10), pp. 19–26. (In Russ.).

20. Придача В.Б. Соотношение N:P:K как гомеостатический показатель функционального состояния хвойных растений в разных экологических условиях: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2002. 24 с.

Pridacha V.B. *The N:P:K Ratio as a Homeostatic Indicator of the Functional State of Coniferous Plants in Different Environmental Conditions*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Petrozavodsk, 2002. 24 p. (In Russ.).

21. Суворова Г.Г., Щербатюк Л.С., Янькова Л.С., Копытова Л.Д. Максимальная интенсивность фотосинтеза ели сибирской и лиственницы сибирской в Прибайкалье // Лесоведение. 2003. № 6. С. 58–65.

Suvorova G.G., Shcherbatyuk A.S., Yan'kova L.S., Kopytova L.D. Maximal Photosynthesis Intensity in Siberian Spruce and Siberian Larch in Near-Baikal Region. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2003, no. 6, pp. 58–65. (In Russ.).

22. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 763 с.

Usol'tsev V.A. *Phytomass of Northern Eurasia Forests: Standards and Elements of Geography*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2002. 763 p. (In Russ.).

23. Феклистов П.А., Филиппов Б.Ю., Болотов И.Н., Кононов О.Д., Торбик Д.Н. Экотонные зоны в лесных экосистемах северной тайги // Вестн. Помор. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2011. № 4. С. 102–105.

Feklistov P.A., Filippov B.Yu., Bolotov I.N., Kononov O.D., Torbik D.N. Transitive Zones in Wood Ecosystems of Northern Taiga. *Vestnik Pomorskogo universiteta of Series "Natural and Exact Sciences"*, 2011, no. 4, pp. 102–105. (In Russ.).

24. Цельникер Ю.Л., Корзухин М.Д., Семёнов С.М. Модельный анализ широтного распределения продуктивности лесных пород России // Лесоведение. 2010. № 2. С. 36–45.

Tsel'niker Yu. L., Korzukhin M.L., Semenov S.M. Model Analysis of Latitudinal Distribution of Forest Species in Russia. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2010, no. 2, pp. 36–45. (In Russ.).

25. Шаньгина Н.П., Феклистов П.А. Индекс поверхности хвои подроста ели под материнским пологом // Экологические проблемы Арктики и северных территорий: межвуз. сб. науч. тр. / отв. ред. П.А. Феклистов. Вып. 14. Архангельск: С(А)ФУ, 2011. С. 33–37.

Shan'gina N.P., Feklistov P.A. Needle Surface Area Index of Spruce Undergrowth Under Maternal Canopy. *Environmental Problems of the Arctic and Northern Territories: Interuniversity Collection of Academic Papers*. Ed. by P.A. Feklistov. Iss. 14. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2011, pp. 33–37. (In Russ.).

26. Begon M., Harper J.L., Townsend C.R. *Ecology: Individuals, Populations and Communities*. Wiley-Blackwell, 1996. 1068 p.

27. Dymond C.C., Neilson E.T., Stinson G., Porter K., MacLean D.A., Gray D.R., Campagna M., Kurz W.A. Future Spruce Budworm Outbreak May Create a Carbon Source in Eastern Canadian Forests. *Ecosystems*, 2010, vol. 13, pp. 917–931. <https://doi.org/10.1007/s10021-010-9364-z>

28. Garcia O. A Parsimonious Dynamic Stand Model for Interior Spruce in British Columbia. *Forest Science*, 2011, vol. 57, iss. 4, pp. 265–280. <https://doi.org/10.1093/forests/57.4.265>
29. Hlásny T., Barka I., Roessiger J., Kulla L., Trombik J., Sarvašová Z., Bucha T., Kovalčík M., Čihák T. Conversion of Norway Spruce Forests in the Face of Climate Change: A Case Study in Central Europe. *European Journal of Forest Research*, 2017, vol. 136, iss. 5-6, pp. 1013–1028. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1028-5>
30. Houle D., Richard P.J.H., Ndzangou S.O., Richer-Lafleche M. Compositional Vegetation Changes and Increased Red Spruce Abundance During the Little Ice Age in a Sugar Maple Forest of North-Eastern North America. *Plant Ecology*, 2012, vol. 213, iss. 6, pp. 1027–1035. <https://doi.org/10.1007/s11258-012-0062-0>
31. Kozak I., Chłódek D., Zawadzki A., Kozak H., Potaczała G. Symulacja przebudowy drzewostanów świerkowych w Bieszczadach za pomocą modelu FORKOME = Conversion Simulation of Spruce Stands in the Bieszczady Mountains with the Aid of FORKOME Model. *Leśne Prace Badawcze*, 2007, no. 2, pp. 7–26. (In Pol.).
32. Mund M., Kummetz E., Hein M., Bauer G.A., Schulze E.-D. Growth and Carbon Stocks of a Spruce Forest Chronosequence in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 2002, vol. 171, iss. 3, pp. 275–296. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00788-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00788-5)
33. O’Connell K.E.B., Gower S.T., Norman J.M. Comparison of Net Primary Production and Light-Use Dynamics of Two Boreal Black Spruce Forest Communities. *Ecosystems*, 2003, vol. 6, pp. 236–247. <https://doi.org/10.1007/PL00021510>
34. Pretzsch H., Dieler J., Seifert T., Rötzer T. Climate Effects on Productivity and Resource-Use Efficiency of Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European Beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in Stands with Different Spatial Mixing Patterns. *Trees*, 2012, vol. 26, pp. 1343–1360. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0710-y>
35. Suvorova G.G., Oskorbina M.V., Kopytova L.D., Yan’kova L.S., Popova E.V. Seasonal Changes in Photosynthetic Activity and Chlorophylls in the Scots Pine and Siberian Spruce with Optimal or Insufficient Moistening. *Contemporary Problems of Ecology*, 2011, vol. 4, iss. 6, pp. 626–633. <https://doi.org/10.1134/S1995425511060105>
36. Tange T. Emulating Natural Disturbances: The Role of Silviculture in Creating Even-Aged and Complex Structures in the Black Spruce Boreal Forest of Eastern North America. *Journal of Forest Research*, 2010, vol. 15, iss. 1, p. 81. <https://doi.org/10.1007/s10310-009-0178-9>

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

---

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



Научная статья

УДК 630\*453:595.799

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-51-64

## Ресурсный потенциал медоносных растений степного Придонья

И.Д. Самсонова, д-р биол. наук, доц.; ResearcherID: [AAE-9327-2021](https://orcid.org/0000-0001-5301-5618),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5301-5618>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; [isamsonova18@mail.ru](mailto:isamsonova18@mail.ru)

Поступила в редакцию 12.02.21 / Одобрена после рецензирования 17.05.21 / Принята к печати 20.05.21

**Аннотация.** К медоносным угодьям относят категории земель лесного фонда, на которых произрастают медоносные и обеспечивающие высокий сбор пыльцы растения. Пчелы, опыляя энтомофильные растения, приносят в 6–10 раз больше пользы лесным угодьям по сравнению с пользой от получения продуктивных медосборов. В задачи исследования входило выявление особенностей эколого-биологических характеристик медоносных растений семейства *Fabacea*, уточнение сроков начала, продолжительности и интенсивности цветения, определение содержания сахара в нектаре 1 цветка и медовой продуктивности в условиях степного Придонья. С целью оценки медоносных ресурсов и установления ресурсного потенциала лесных угодий были заложены учетные площадки маршрутным методом. Необходимые наблюдения, учетные работы и математико-статистическая обработка данных проводились по общепринятым методикам. Территории степного Придонья, на которых расположены земли лесного фонда Ростовской области, отличаются благоприятными погодными условиями и богатой кормовой базой для пчел. Медовый потенциал изучаемых ресурсов является динамичным показателем и представляет интерес как для лесного пчеловодства, так и для научного исследования. С использованием полученных нами сумм эффективных температур определены очередность и особенности цветения медоносных растений. Первым из древесных медоносных растений семейства бобовых зацветает миндаль степной, последней, в середине летнего периода медосбора, – софора японская. Наибольшей медовой продуктивностью отличаются лесные насаждения робинии псевдоакалии (497 кг/га), угодья с преобладанием софоры японской (484 кг/га) и гледичий трехколючковой (245 кг/га). Результаты исследований показали, что значимыми для медосбора на землях лесного фонда являются насаждения робинии псевдоакалии с биоресурсным потенциалом (7111,29 т) в восточных и центральных районах области. Лесные угодья с преобладанием весенних медоносных растений дерезы и степного миндаля на нелесных землях лесного фонда обеспечивают поддерживающий медосбор с биоресурсным потенциалом 2749,168 т. Проведенные исследования имеют практическое значение и позволят в дальнейшем более точно определять ресурсный потенциал лесных угодий для медосбора. При высоком уровне культуры ведения лесного хозяйства и пчеловодства даже при неблагоприятных погодных условиях в период сбора нектара возможно будет получать продуктивный медосбор, при этом обеспечивая своевременное и эффективное опыление лесных растений.

**Ключевые слова:** медоносные растения, *Fabacea*, медоносные растения семейства *Fabacea*, робиния псевдоакация, медовая продуктивность, ресурсный потенциал, лесной фонд, медосбор, Ростовская область, степное Придонье

**Для цитирования:** Самсонова И.Д. Ресурсный потенциал медоносных растений степного Придонья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 51–64. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-51-64>

Original article

## Resource Potential of Melliferous Plants of the Steppe Don Region

**Irina D. Samsonova**, Doctor of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAE-9327-2021](https://orcid.org/0000-0001-5301-5618),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5301-5618>

Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; [isamsonova18@mail.ru](mailto:isamsonova18@mail.ru)

Received on February 12, 2021 / Approved after reviewing on May 17, 2021 / Accepted on May 20, 2021

**Abstract.** Melliferous lands comprise the categories of forest fund lands, where melliferous plants and plants that provide high pollen yield grow. Bees pollinating entomophilous plants are 6–10 times more beneficial to forest lands compared to the favours from productive honey flows. The research objectives included identifying the features of the ecological and biological characteristics of melliferous plants of the *Fabacea* family, specifying the onset, duration and intensity of flowering, determining the sugar content in the nectar of one flower and honey productivity in the steppe Don region. Registration plots were laid out by the route method for the assessment of melliferous resources and determination of the resource potential of forest lands. Necessary observations, registration work, mathematical and statistical data processing were carried out according to the generally accepted methods. The territory of the steppe Don region, where the forest fund lands of the Rostov region are located, has favorable weather conditions and a rich forage base for bees. The honey potential of the studied resources is a dynamic indicator and is of interest both for forest beekeeping and for scientific research. We used the sums of effective temperatures to determine the flowering sequence and characteristics of melliferous plants. The dwarf Russian almond blossoms first among arboreal melliferous plants of the legume family, while the Japanese pagoda tree blossoms last in the middle of the summer honey flow period. Black locust forest stands (497 kg/ha), lands dominated by Japanese pagoda tree (484 kg/ha) and honey locust (245 kg/ha) have the highest honey productivity. The research results showed that the black locust plantations with a bioresource potential of 7111.29 ton in the eastern and central areas of the region are significant for honey flow on the forest fund lands. Forest lands with predominance of spring melliferous plants of boxthorn and dwarf Russian almond on non-forest lands of the forest fund provide a supporting honey flow with a bioresource potential of 2749.168 ton. The studies that were carried out are of practical importance and will allow determining the resource potential of forest lands for honey flow more accurately in the future. In case of a high level of forestry and beekeeping practices, even under adverse weather conditions during nectar harvesting, it will be possible to obtain a productive honey flow, while ensuring timely and effective pollination of forest plants.

**Keywords:** melliferous plants, *Fabacea*, honey plants of *Fabacea* family, black locust, honey productivity, resource potential, forest fund, honey flow, Rostov region, steppe Don region



**For citation:** Samsonova I.D. Resource Potential of Melliferous Plants of the Steppe Don Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 51–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-51-64>

### Введение

Лесное хозяйство и пчеловодство имеют давнюю общую историю [5]. Однако на глобальном уровне систематические данные и научные исследования о взаимодействии между лесным хозяйством и пчеловодством довольно скудны [15].

К медоносным угодьям, отличающимся большим количеством нектаро- и пыльценосных растений, относятся различные категории земель лесного фонда, на которых возможно получение продуктивного медосбора. Помимо производства ценной продукции пчеловодства пчелиные семьи, опыляя лесные растения, помогают обеспечивать их высокую продуктивность и способствуют сохранению и благоприятному развитию естественных популяций лесных видов [5, 14]. D. Srdić подсчитал, что косвенная выгода от пчел, т. е. польза, которую приносят пчелы как в сельскохозяйственных, так и в лесных угодьях, в 6–10 раз больше, чем польза, которую пчелы приносят, производя мед и воск [20]. A. Perušić, также заключая, что польза от опыления во много раз больше, чем польза от получения меда и других продуктов пчеловодства (воск, маточное молочко, пыльца, прополис, пчелиный яд), предлагает строить новую систему пчеловодства. Ее основной задачей станет опыление, а производство меда и других пчелиных продуктов будет только побочной деятельностью [18]. Европейские ученые отмечают, что продукты, полученные с деревьев, подлеска, грибов и животных, имеют биологическое происхождение. К ним относятся лесной мед, пыльца и прополис высокого качества [17, 19]. В то же время на популяции насекомых и их адаптацию к новым условиям окружающей среды негативно влияют трансформации земель, включая предыдущее обезлесение и интенсивное культивирование [16].

Многолетние исследования учеными медоносных растений из семейства бобовых показали, что изучаемые представители входят в группу естественной флоры медоносных угодий, которая является наиболее многочисленной. Эколого-биологические особенности медоносов семейства бобовых изучали В.К. Пельменев и Л.Ф. Харитоновна [8], Е.Г. Пономарева, Е. Губеладзе [1]. Во флоре России насчитывается около 2000 видов растений из семейства бобовых. Среди них отмечены первостепенные и второстепенные медоносы из рода робиния (*Robinia* L.), донник (*Melilotus* Mill.), клевер (*Trifolium* L.), лядвинец (*Lotus* L.), карагана (*Caragana* Lam.), эспарцет (*Onobrychis* Mill.) и горошек (*Vicia* L.).

Одним из самых изученных медоносов семейства бобовых является акация белая (*Robinia pseudoacacia* L.). Б. Керестеши в своей работе рассматривает вопрос улучшения качества лесов Венгрии, как чистых, так и в составе с акацией белой, за счет распространения селекционных сортов этого вида [2]. Определением нектаропродуктивности и влиянием различных факторов на этот показатель в Азербайджане занимались исследователи А.П. Блажиевская, А.М. Кулиев, в Белоруссии – Л.Г. Кушнир [3]. Ученые АПИ-лаборатории Кубанского государственного университета Л.Я. Морева, М.П. Отришко, А.А. Ефименко рассматривали вопросы эколого-биологических характеристик медоносных растений, особенности их цветения, а также медовую продуктивность акации белой. Важным моментом для оценки медовой базы стало определение площадей акациевых насаждений на территории Южного федерального округа России и их

динамики под воздействием ряда факторов [4]. Медовая продуктивность акации белой по наблюдениям В.К. Пельменева высокая: на Украине, в Румынии – 600–800, в Нечерноземной зоне – до 360 кг с 1 га сплошного древостоя.

Определением медовой продуктивности акации желтой (*Caragana arborescens* L.) занимались Е.Т. Клименкова и М.М. Глухов, гледичии трехколючковой (*Gleditsia triacanthos* L.) на территории Азербайджана – А.М. Кулиев.

Медоносные ресурсы с течением времени оказываются под негативным влиянием всевозможных факторов. Для сохранения биоразнообразия и устойчивости экосистем необходимо систематически и всесторонне исследовать составляющие их виды и популяции. Изучение эколого-биологических характеристик медоносных растений позволит рационально использовать ресурсный потенциал медоносных угодий в период медосбора. Для объективной оценки условий медосбора необходимо проводить своевременные наблюдения за фенологией медоносных растений. Полученные данные о медовой продуктивности медоносных растений, а также лесных угодий и примыкающих к ним экосистем для медосбора будут способствовать эффективному использованию ресурсов.

Цель исследования – изучение эколого-биологических характеристик древесно-кустарниковых медоносных растений семейства *Fabacea* и определение ресурсного потенциала лесных угодий для медосбора в условиях степного Придонья.

#### Объекты и методы исследования

Оценку медоносных растений начинали с закладки учетных площадок маршрутным методом, на которых устанавливали численность экземпляров на 1 га. Наблюдали за сроками, продолжительностью и интенсивностью цветения, а также отбирали цветки для определения содержания сахара в нектаре 1 цветка. Для установления средних сроков начала цветения медоносных растений использовали такой показатель, как сумма эффективных температур [11]. Для определения количества сахара в нектаре – метод смывания и рефрактометр ИРФ-22 [6]. Полученное процентное содержание сахара в нектаре переводили в миллиграммы по формуле Л.В. Сухановой [13]. Медовую продуктивность изучаемого медоносного растения и угодий для медосбора вычисляли по формуле, предложенной учеными Новочеркасской государственной мелиоративной академии [13]. Материалы полевых исследований обрабатывали с помощью математических и статистических методов.

Для установления ресурсного потенциала медоносных угодий всех категорий земель лесного фонда уточняли их площади, используя таксационные описания лесничеств Ростовской области. Биоресурсный потенциал и медовые запасы медоносных угодий определили по методике П.В. Сидаренко, И.Д. Самсоновой [12]. В целях оценки медосбора с насаждений робинии псевдоакалии проводили районирование лесных угодий региона по медовому запасу.

По результатам статистической обработки вариационных рядов определяли параметры среднего медового запаса ( $M \pm \sigma$ ) по всем административным районам. При этом стандартную ошибку вариационных рядов вычисляли по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum (M - X_i)^2 / (n - 1)},$$

где  $M$  – средний медовый запас угодий по области, %;  $X_i$  – медовый запас  $i$ -го административного района, %;  $n$  – количество административных районов.

*Результаты исследования и их обсуждение*

Анализ медоносных угодий на территории лесного фонда степного Придонья показал, что они составлены разнообразными видами, отсюда вариабелен показатель медоносной ценности [9]. Поэтому нами изучены медоносные древесно-кустарниковые растения семейства *Fabacea*, которые особенно важны для лесного пчеловодства данного региона и способствуют получению продуктивного медосбора в условиях, складывающихся в исследуемой местности.

Ростовская область находится на юге европейской части России. Местоположение способствует благоприятным ландшафтным и климатическим условиям для устойчивого развития отрасли пчеловодства. Районы области характеризуются богатым видовым разнообразием. Несмотря на низкую лесистость территории области (2,5 %), исследуемый регион считается ценным для получения продуктивных медосборов с известного в масштабах страны майского медоноса, робинии псевдоакации, а на нелесных землях лесного фонда на протяжении всего периода медосбора – с обильно выделяющей нектар медоносной растительности [10].

В степном Придонье робиния псевдоакация является основным медоносом в первый главный период медосбора, но характеризуется изменчивостью количества выделяемого нектара под влиянием погодных условий.

Робиния псевдоакация, или акация белая (*Robinia pseudoacacia* L.), в условиях степного Придонья в возрасте 20 лет представляет достаточно развитое дерево высотой 13–15 м, с хорошо развитой кроной, на которой, по многолетним данным исследователей, бывает до 200–300 тыс. цветков. Цветение на юге России отмечено с 3–4-летнего возраста дерева, после распускания листьев, а в средней полосе – с 4–7-летнего возраста. Белые крупные цветки от 18 до 35 шт. собраны в кисти длиной 15–17 см. В основном пчелы с цветков робинии собирают нектар. После прекращения выделения нектара, в конце цветения, пчел к цветкам акации белой привлекает пыльца, которая выделяется в незначительном количестве, из нее пчелы производят обножку серо-желтого цвета.

Ученые проводили многолетние наблюдения за началом, продолжительностью и интенсивностью цветения растений в условиях Ростовской области, определяя суммы эффективных температур. Зафиксирована средняя дата начала цветения робинии псевдоакации, которая приходится на 17 мая при накоплении суммы эффективных температур 374,0 °С [12]. Ранним временем цветения считается 6 мая, а поздним – 29 мая. Время наступления цветения связано с изменением погодных условий по годам. Биологические особенности цветения робинии псевдоакации, в частности раскрытие всех цветков в кисти одновременно, которое длится 3–4 дня, обуславливают кратковременность цветения медоносного растения в засушливых районах юго-востока области (рис. 1).

Последовательность раскрытия цветков по ярусам наблюдается снизу вверх. Цветение продолжается в среднем 2–3 нед. При этом нектар выделяется только 7–12 дн. и начинает свое движение по нектарникам на 7-й день цветения. Содержание сахара в нектаре 1 цветка составляет, по нашим данным,  $2,19 \pm 0,17$  мг/сут. (табл. 1). Цветение заканчивается при накоплении суммы эффективных температур 570,4 °С. Отмечено, что неопыленные цветки увядают быстрее опыленных на 1 день. Таким образом, процесс нектаровыделения находится под влиянием многих факторов. Изученные особенности цветения и секреции нектара необходимо учитывать при оценке медоносного потенциала угодий.





Рис. 1. Цветение насаждений *Robinia pseudoacacia* L.  
Fig. 1. Flowering plantations of *Robinia pseudoacacia* L.

Акация желтая, или карагана древовидная (*Caragana arborescens* L.), представляет собой невысокий – до 2–5 м – кустарник с ажурной, цветущей в весенний период кроной. Вид отличается быстрым ростом, устойчив к засухе и неприхотлив к почве, поэтому встречается в разреженных лесах, на открытых склонах и по берегам рек. Название растения связано с появлением в фенофазу цветения желтых, в пучках по 2–5, цветков (рис. 2).



Рис. 2. Цветение *Caragana arborescens* L.  
Fig. 2. Flowering of *Caragana arborescens* L.

Цветение отмечено в апреле–мае на протяжении 15 дн. Средние сроки начала цветения зарегистрированы нами 29.04–14.05 при накоплении суммы эффективных температур воздуха  $202,6 \pm 3,3$  °C (табл. 1). Каждый год во время цветения стабильно присутствует значительное количество пчел. Содержание сахара в нектаре 1 цветка составляет, по нашим данным,  $0,45 \pm 0,05$  мг/сут. Динамика сахаропродуктивности 1 цветка, по нашим наблюдениям и наблюдениям других ученых, не зависит от условий произрастания. Интенсивность цветения находится в тесной зависимости от состава и увлажнения почвы, а также от условий освещения. В затененной местности количество цветков уменьшается.

Аморфа кустарниковая (*Amorpha fruticosa* L.) – красиво цветущий медоносный кустарник – достигает высоты до 2,5–3 м. Цветет в мае–июне. Средние сроки начала цветения зарегистрированы нами 20.05–7.06 при накоплении суммы эффективных температур воздуха  $451,6 \pm 3,3$  °C (табл. 1).

Таблица 1

Цветение и медовая продуктивность медоносных растений семейства *Fabaceae*  
Flowering and honey productivity of melliferous plants in the *Fabaceae* family

Медоносное растение	Средние сроки цветения	Сумма эффективных температур в начале цветения, °С	Продолжительность жизни цветка, сут.	Количество сахара, выделенного 1 цветком, мг		Число цветков на 1 растение	Количество растений на 1 га	Медовая продуктивность, кг/га
				за сутки	за период цветения			
Миндаль степной	23.04–30.04	118,0±3,2	4	0,16±0,03	0,64	45	83 000	3
Акация желтая	29.04–14.05	202,6±3,3	3	0,45±0,05	1,35	1200	8500	17
Дереза	3.05–17.05	203,6±6,6	4	0,18±0,02	0,72	60	55 000	3
Робиния псевдоакация	17.05–29.05	376,0±2,4	4	2,19±0,17	8,76	200 000	227	497
Аморфа кустарниковая	20.05–7.06	451,6±3,3	2	0,18±0,01	0,36	110 000	800	40
Гледичия трехколочковая	25.05–15.06	470,4±3,6	1	0,12±0,01	0,12	8 000 000	204	245
Софора японская	12.07–19.08	1228±15,1	4	1,77±0,11	7,08	300 000	182	484



Цветки, в среднем по 150–200 шт., с фиолетовым венчиком собраны в густые кисти длиной 10–20 см и раскрываются постепенно от основания соцветия до верхушки, что увеличивает продолжительность цветения аморфы в период медосбора до 20 дн. (рис. 3). Содержание сахара в нектаре 1 цветка составляет, по данным наших исследований,  $0,18 \pm 0,01$  мг/сут. (табл. 1). Пыльцу пчелы собирают красно-оранжевого цвета. Наблюдения за активностью посещения цветков аморфы кустарниковой пчелами на пасеках, расположенных по опушкам лесов и на открытых местах, в поймах, подтвердили присутствие в цветках медоноса значительного количества нектара и пыльцы.



Рис. 3. Цветение *Amorpha fruticosa* L.

Fig. 3. Flowering of *Amorpha fruticosa* L.

Гледичия обыкновенная, или трехколючковая (*Gleditsia triacanthos* L.), – быстрорастущая порода, достигает высоты 20–40 м. Отличается декоративной широкой ажурной кроной. Светлюбивое и устойчивое к засухе дерево, нетребовательно к почве и хорошо переносит некоторую их засоленность. Зацветает в конце мая – начале июня, как обнаружено нами, с 25 мая по 15 июня при накоплении суммы эффективных температур  $470,4$  °C (табл. 1). Продолжительность цветения составляет 8–12 дн., при этом жизнь 1 цветка – 1 день. Зеленоватые и опушенные цветы, отличающиеся душистым запахом, собраны в густые кисти длиной до 8 см. (рис. 4). Цветки гледичии выделяют нектар и пыльцу. По наблюдениям ученых, среднесуточное количество нектара с одного цветка  $0,15$  мг, по нашим данным –  $0,12$  мг. Сбор нектара с гледичии пчелами происходит неинтенсивно, так как сроки ее цветения совпадают с цветением высокопродуктивного медоноса – эспарцета.



Рис. 4. *Gleditsia triacanthos* L. в конце цветения

Fig. 4. *Gleditsia triacanthos* L. at the end of flowering

Софора японская (*Sophora japonica* L.) отличается декоративностью и медоносной ценностью. Дерево вырастает до 25 м в высоту. Требовательно к свету. Цветет в июле–августе на протяжении месяца с 10–15-летнего возраста. Пышная раскидистая крона создает эстетическую красоту и привлекает пчел. По нашим наблюдениям, средние сроки начала цветения приходятся на 12 июля–19 августа при накоплении суммы эффективных температур 1228 °С. Неприметные небольшие желтые мотыльковые цветки собраны в длинные соцветия. Их цветение длится 3–4 дн. (рис. 5).



Рис. 5. Цветение *Sophora japonica* L.

Fig. 5. Flowering of *Sophora japonica* L.

Софора японская – высокопродуктивное медоносное растение. Даже в anomalно сухую погоду, которая зачастую складывается в летний период на территории степного Придонья, цветки выделяют много нектара и активно посещаются пчелами. Содержание сахара в нектаре 1 цветка составляет, по нашим данным,  $1,77 \pm 0,11$  мг/сут. (табл. 1). Причем собирают нектар и после опадения цветков. По данным В.А. Нестерводского, в условиях Одесской области за период цветения пчелиная семья может собрать 15 кг ароматного светлого меда [7]. Софора японская устойчива к морозу и засухе, нетребовательна к почве. Соседство ей составляют айлант и робиния псевдоакация.

Степной, или дикий, миндаль (*Amygdalus nana* L.), кустарник высотой до 1 м, отличается вверх стоящими ветвями (рис. 6). Растет только на открытой местности, морозостоек, не требователен к влаге и почвам. Цветение миндаля, по нашим данным, наблюдается 23.04–30.04 и продолжается в течение 7–9 дн. Розовые цветки скучены на коротких веточках по 50–55 шт. на 1 растении, отличаются резким запахом и живут 3–4 дн. Густота произрастания на нелесных землях лесного фонда (пастбища, сенокосы) составляет до 32 кустов/м<sup>2</sup>. Пчелы собирают нектар и красноватую пыльцу. Содержание сахара в нектаре одного цветка составляет, по нашим данным,  $0,16 \pm 0,03$  мг/сут. (см. табл. 1).

Дереза, чилига, сибирек (*Caragana frutex* L.), – густой, невысокий кустарник. Зацветает, по нашим наблюдениям, с 3 по 17 мая при накоплении суммы эффективных температур 203,6 °С, почти одновременно с желтой акацией. Желтые, мотыльковые цветки расположены на ветках растения по одному (рис. 7). Содержание сахара в нектаре 1 цветка составляет, как зафиксировано нами,  $0,18 \pm 0,02$  мг/сут.

Вид не требователен к влаге и почве, при этом требователен к свету. На территории районов исследования встречается в виде зарослей на различных элементах рельефа балочной системы. Количество кустарников на 1 м<sup>2</sup> колеблется от 15 до 30 шт. в зависимости от экспозиции склона (табл. 1).



Рис. 6. Заросли и цветение *Amygdalus nana* L.

Fig. 6. Thicket and flowering of *Amygdalus nana* L.



Рис. 7. Цветение *Caragana frutex* L.

Fig. 7. Flowering of *Caragana frutex* L.

Используя полученные в результате исследований данные о содержании сахара в нектаре, рассчитали медовую продуктивность древесно-кустарниковых бобовых медоносных растений (табл. 1).

Анализ медосборных условий степного Придонья показал, что интерес для пчел представляют медоносные растения, интенсивно цветущие, содержащие значительное количество сахара в нектаре, встречающиеся повсеместно и, как следствие, с высокой медовой продуктивностью (рис. 8), а также лесные уголья, занимающие обширные площади на территории района исследований (табл. 2).

Полученные нами данные по медовой продуктивности робинии псевдоакации – около 500 кг/га – согласуются с результатами исследований ряда ученых и подтверждают ее ведущую позицию в период первого главного медосбора среди медоносных растений в условиях степного Придонья.

Медовая продуктивность гледичии трехколючковой и аморфы кустарниковой с незначительным содержанием сахара в нектаре 1 цветка (соответственно 0,12 и 0,18 мг) составляет 245 и 40 кг/га соответственно, что доказано нашими исследованиями и зависит от биологических особенностей растений, интенсивности цветения и густоты произрастания.



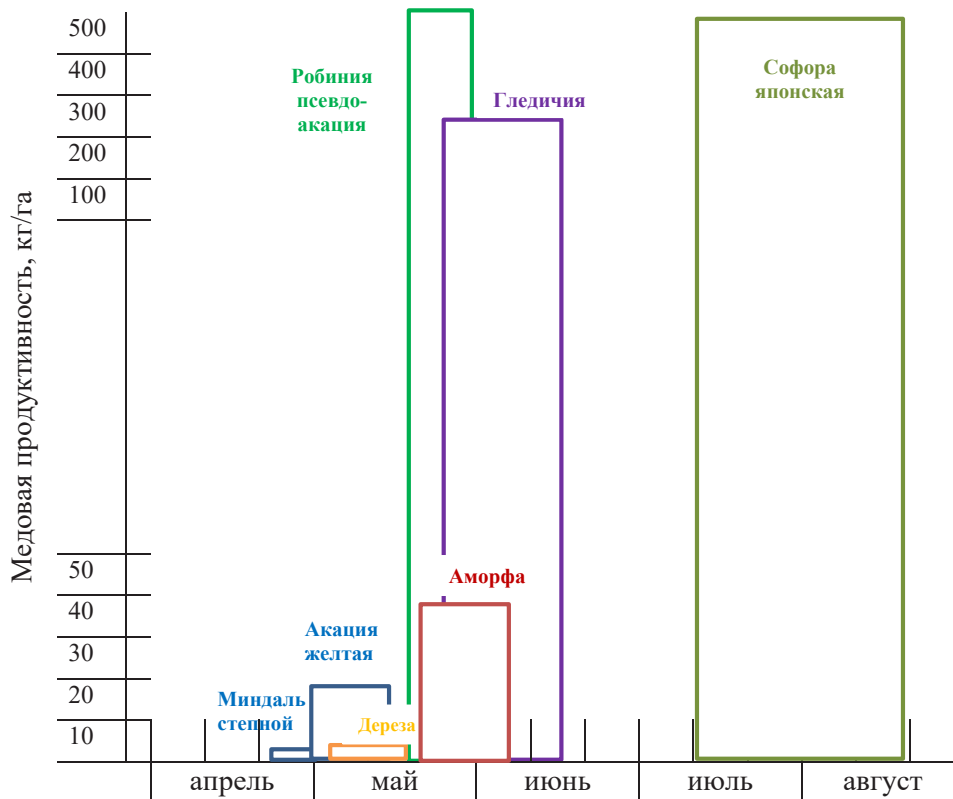


Рис. 8. Периоды сбора меда с медоносных растений семейства *Fabacea*

Fig. 8. Periods of honey flow from melliferous plants of the *Fabacea* family

Софора японская отличается высокой медовой продуктивностью (484 кг/га), но на территории Ростовской области, по данным департамента лесного хозяйства, ее площади незначительны.

На схеме рис. 8 видно, что, несмотря на низкую медовую продуктивность (3 кг/га), миндаль степной и дереза являются значимыми для пчел, так как во время отсутствия цветения медоносных ресурсов обеспечивают поддерживающий медосбор.

Таким образом, важной и перспективной породой для пчеловодства с высоким биоресурсным потенциалом (7111 т) и значительной площадью (18,609 тыс. га) на землях лесного фонда является робиния псевдоакация (табл. 2).

По данным департамента лесного хозяйства Ростовской области, площади робиниевых насаждений на землях лесного фонда увеличились от 13,3 тыс. га в 1980 г. до 20,4 тыс. га в 2018 г., что связано с активной посадкой лесных культур для создания защитных средообразующих лесонасаждений. На землях лесного фонда с использованием статистической обработки данных вариационных рядов нами было проведено районирование области по медовому запасу насаждений робинии псевдоакации (рис. 9).

К районам с пониженным медовым запасом относятся земли лесного фонда с показателями  $M \leq 0,6$ , где  $M = 2,3 \pm 1,7$ ; со средним –  $0,6 < M < 4,0$ ; с повышенным –  $M \geq 4,0$ . Основные насаждения робинии псевдоакации сосредоточены в центральной и восточной частях области: в Романовском, Обливском, Зимовниковском, Сальском, Миллеровском и Каменском районах.

Таблица 2

**Биоресурсный потенциал и медовый запас угодий для медосбора на землях  
лесного фонда Ростовской области**  
**Bioresource potential and honey reserve of lands for honey flow on the forest  
fund lands of the Rostov region**

Преобладающие медоносы	Площадь, га	Биоресурсный потенциал лесов, т	Медовый запас	
			т	%
<i>Лесные земли</i>				
Робиния псевдоакация	18 609	7111,290	4444,560	71,70
Гледичия трехлопучковая	311,5	26,478	16,548	0,27
Акация желтая, аморфа, софора японская	544,4	35,386	22,116	0,36
<i>Нелесные земли (пастбища, сенокосы)</i>				
Миндаль степной, дереза	585 020	2749,168	1718,23	27,7
<i>Итого</i>		9922,322	6201,454	100

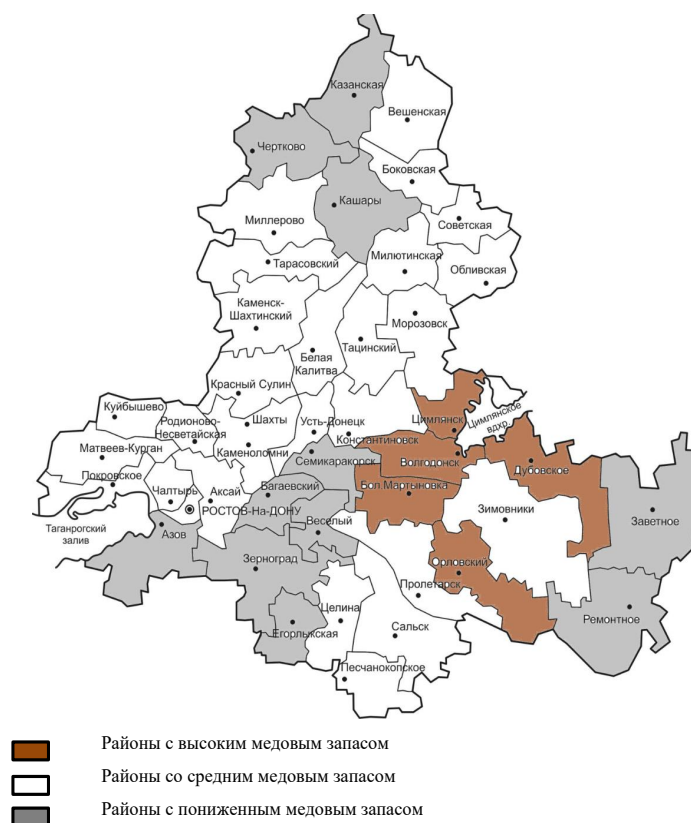


Рис. 9. Районирование территории Ростовской области по значимости лесных угодий робинии псевдоакация для медосбора

Fig. 9. Regionalization of the Rostov region territory by the importance of black locust forest lands for honey flow

Большой биоресурсный потенциал (2749,168 т) имеют также нелесные земли лесного фонда на площади 585 020 га, на которых произрастают такие весенние медоносные растения, как миндаль степной и дереза.

Таким образом, медоносные угодья лесов с преобладанием древесно-кустарниковых медоносных растений семейства *Fabacea* исследуемого региона характеризуются значительным биоресурсным потенциалом – 9922,322 т.

## Выводы

1. Полученные в ходе исследования суммы эффективных температур указывают на растянутый период цветения изучаемых медоносных растений семейства *Fabacea*. Первым из медоносных растений зацветает миндаль степной, высокопродуктивная робиния псевдоакация начинает цветение в середине мая, в середине июля зацветает софора японская. Знания об эффективных температурах позволят своевременно планировать и организовывать кочевку пчелиных семей.

2. Медовая продуктивность у робинии псевдоакация составляет 497 кг/га, софоры японской – 484 кг/га, гледичии трехкочковой – 245 кг/га, аморфы кустарниковой – 40 кг/га, акации желтой – 17 кг/га, дерезы и миндаля степного – 3 кг/га.

3. Биоресурсный потенциал изучаемых медоносных угодий в Ростовской области – около 9922,322 т, из них пчелы могут использовать 6201,454 т.

4. Основные насаждения робинии псевдоакация сосредоточены в центральных и восточных районах области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Губеладзе Е. Биоэкология распространенных в Имерети некоторых медоносных древесных бобовых растений и их использование: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Тбилиси, 2006. 24 с.

Gubeladze E. *Bioecology of Some Melliferous Woody Legumes Common in Imeretia and Their Use*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Tbilisi, 2006. 24 p. (In Russ.).

2. Керестеси С. Лес белой акации – база венгерского пчеловодства // Апиакта. 1984. № 1. С. 1–9.

Kerestesi S. Black Locust Forest is the Base of Hungarian Beekeeping. *Apiacta*, 1984, no. 1, pp. 1–9. (In Russ.).

3. Клименкова Е.Т., Кушнир Л.Г., Бачило А.И. Медоносы и медосбор. Минск: Ураджай, 1981. 280 с.

Klimenkova E.T., Kushnir L.G., Bachilo A.I. *Melliferous Plants and Honey Flow*. Minsk, Uradzhay Publ., 1981. 280 p. (In Russ.).

4. Косицын В.Н. Лесной медонос – акация белая // Пчеловодство. 2009. № 4. С. 18–19. Kositsyn V.N. A Forest Melliferous Plant – Black Locust. *Pchelovodstvo*, 2009, no. 4, pp. 18–19. (In Russ.).

5. Кучеров Е.В., Сираева С.М. Медоносные растения Башкирии. М.: Наука, 1980. 128 с. Kucherov E.V., Siraeva S.M. *Melliferous Plants of Bashkiriya*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 128 p. (In Russ.).

6. Ливенцева Е.К. О методике определения нектаропродуктивности растений // Пчеловодство. 1954. № 11. С. 33–39.

Liventseva E.K. On the Method of Determining the Nectar Productivity of Plants. *Pchelovodstvo*, 1954, no. 11, pp. 33–39. (In Russ.).

7. Мегедь А.Г., Полищук В.П. Пчеловодство. Киев: Выща. шк., 1990. 325 с.

Meget' A.G., Polishchuk V.P. *Beekeeping*. Kiev, Vyshcha shkola Publ., 1990. 325 p. (In Russ.).

8. Пельменев В.К., Харитонов Л.Ф. Медоносы семейства бобовых // Пчеловодство. 1986. № 2. С. 13–14.

Pel'menev V.K., Kharitonova L.F. Melliferous Plants of the Legume Family. *Pchelovodstvo*, 1986, no. 2, pp. 13–14. (In Russ.).

9. Самсонова И.Д. Оценка медоносных ресурсов на землях лесного фонда Ростовской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 1. С. 45–53.

Samsonova I.D. Evaluation of Nectariferous Resources on Forest Lands of the Rostov Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2015, no. 1, pp. 45–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.1.45>

10. Самсонова И.Д. Медопродуктивность растительных формаций на землях лесного фонда степного Придонья // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 69–83.

Samsonova I.D. Melliferous Capacity of Plant Formations in Forest Area Lands of the Steppe Don Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 4, pp. 69–83. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.4.69>

11. Самсонова И.Д., Сидаренко П.В. Медоносы Нижнего Дона. Новочеркасск: НГМА, 2011. 114 с.

Samsonova I.D., Sidarenko P.V. *Melliferous Plants of the Lower Don*. Novocherkassk, NGMA Publ., 2011. 114 p. (In Russ.).

12. Сидаренко П.В., Самсонова И.Д., Богданова И.Б., Малащук В.В., Власенко А.А., Сидаренко Д.П., Жуков Р.Б. Оценка, использование и улучшение биоресурсного потенциала лесов и сельскохозяйственных угодий для медосбора в Ростовской области: науч.-метод. рекомендации. Новочеркасск, 2010. 47 с.

Sidarenko P.V., Samsonova I.D., Bogdanova I.B., Malashchuk V.V., Vlasenko A.A., Sidarenko D.P., Zhukov R.B. *Evaluation, Use and Improvement of Bioresource Potential of Forests and Farmlands for Honey Flow in the Rostov Region*. Novocherkassk, 2010. 47 p. (In Russ.).

13. Суханова Л.В., Котов М.М. Лесные ресурсы пчеловодства // Пчеловодство. 2000. № 6. С. 23–24.

Sukhanova L.V., Kotov M.M. Forest Resources of Beekeeping. *Pchelovodstvo*, 2000, no. 6, pp. 23–24. (In Russ.).

14. Bradbear N. *Bees and Their Role in Forest Livelihoods*. Rome, FAO Publ., 2009, no. 19. 194 p.

15. Hill D.B., Webster T.C. Apiculture and Forestry (Bees and Trees). *Agroforestry Systems*, 1995, vol. 29, iss. 3, pp. 313–320. <https://doi.org/10.1007/BF00704877>

16. Kremen C., Williams N.M., Bugg R.L., Fay J.P., Thorp R.W. The Area Requirements of an Ecosystem Service: Crop Pollination by Native Bee Communities in California. *Ecology Letters*, 2004, no. 7, iss. 11, pp. 1109–1119. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00662.x>

17. Oddo L.P., Piro R., Bruneau E., Guyot-Declerck Ch., Ivanov T., Piskulova J. et al. Main European Unifloral Honeys: Descriptive Sheets. *Apidologie*, 2004, vol. 35, iss. suppl. 1, pp. S38–S81. <https://doi.org/10.1051/apido:2004049>

18. Perušić A. Šuma u pčelarskoj privredi. *Šumarski list*, 1961, vol. 85(1-2), pp. 46–50.

19. Rybak-Chmielewska H., Szczęsna T., Waś E., Jaśkiewicz K., Teper D. Characteristics of Polish Unifloral Honeys IV: Honeydew Honey, Mainly *Abies alba* L. *Journal of Apicultural Science*, 2013, vol. 57, iss. 1, pp. 51–59. <https://doi.org/10.2478/jas-2013-0006>

20. Srdić D. Važnost pčelarstva za šumarstvo. *Šumarski list*, 1946, vol. 1-6, pp. 55–56.

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interest:** The author declares that there is no conflict of interest



Научная статья

УДК 630\*182.5+630\*228.82

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-65-76

## Формирование надземной фитомассы лиственных древесных пород на постагrogenных землях

*Д.А. Данилов<sup>1,2</sup>, д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [S-7007-2019](https://orcid.org/0000-0002-7504-5743).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7504-5743>*

*А.А. Яковлев<sup>1,2</sup>, аспирант; ResearcherID: [AAR-5081-2021](https://orcid.org/0000-0001-8450-2806).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8450-2806>*

*С.А. Суворов<sup>1</sup>, ассистент; ResearcherID: [AAC-9497-2022](https://orcid.org/0000-0002-4429-8131).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-8131>*

*И.А. Крылов<sup>1</sup>, сопр.; ResearcherID: [ADM-9554-2022](https://orcid.org/0000-0001-7122-2418).*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7122-2418>*

*С.А. Корчагов<sup>3</sup>, д-р с.-х. наук, директор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5492-9550>*

*Р.С. Хамитов<sup>4</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>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия, 194021; stown200@mail.ru, artem95692@gmail.com<sup>✉</sup>, sergey\_suvorov1999@mail.ru, diesdthebest@yandex.ru

<sup>2</sup>Ленинградский научно-исследовательский институт сельского хозяйства «Белогорка» – филиал Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха, ул. Институтская, д. 1, д. Белогорка, Гатчинский р-н, Ленинградская обл., Россия, 188388; stown200@mail.ru, artem95692@gmail.com<sup>✉</sup>

<sup>3</sup>ООО «Вологдалесникцентр», ул. Дальняя, д. 20 д, г. Вологда, Россия, 160000; kors45@yandex.ru

<sup>4</sup>Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Панкратова, д. 9 а, корп. 7, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555; r.s.khamitov@mail.ru

Поступила в редакцию 11.02.21 / Одобрена после рецензирования 16.05.21 / Принята к печати 18.05.21

**Аннотация.** Вывод земель из активного сельскохозяйственного пользования и их зарастание древесной растительностью имеют устойчивый характер в России, особенно в бореальной зоне. Изучение насаждений, сформировавшихся на залежных землях сельскохозяйственных территорий, позволяет оценить их ресурсный потенциал для дальнейшего использования. Наиболее достоверным показателем продуктивности местообитаний является надземная фитомасса растительности. Посредством оценки фитомассы древесно-кустарниковой растительности возможно определить объем депонирования углерода, что актуально в условиях глобального изменения климата. Объектом исследования стало поле в Гатчинском районе Ленинградской области, вышедшее из активного сельскохозяйственного пользования. Заложена пробная площадь, на которой проведен сплошной пересчет аборигенных лиственных пород (береза, осина, древовидные и кустарниковые ивы) с определением основных таксационных показателей. Для установления объема фитомассы спиливалось от 6 до 8 модельных деревьев каждой породы. На основе полученных данных по величинам отдельных фракций надземной части ствола были выведены аллометрические уравнения для расчета фракционного

состава фитомассы, обладающие высоким коэффициентом детерминации. Точность построенных уравнений снижается за счет высокой вариабельности характеристик крон в густом листовенном молодняке. Наибольшая фитомасса приходится на стволовую часть, а наименьшая – на ассимиляционный аппарат для всех пород древесной растительности. Расчет надземной фитомассы на опытном участке по полученным уравнениям показал, что самое высокое значение в пересчете на 1 га на данной сукцессионной стадии характерно для березы пушистой. Участие древесной растительности постагрогенных земель в депонировании углерода на сегодняшний день не имеет достоверной полной оценки для региона исследования. Древесина, произрастающая на вышедших из активного сельскохозяйственного пользования землях, может быть использована для получения биотоплива и заготавливаться в виде технологической щепы.

**Ключевые слова:** аллометрические уравнения, фитомасса, надземная фитомасса, аллометрические уравнения для расчета фитомассы, листовенные насаждения, постагрогенные земли, Ленинградская область

**Для цитирования:** Данилов Д.А., Яковлев А.А., Суворов С.А., Крылов И.А., Корчагов С.А., Хамитов Р.С. Формирование надземной фитомассы листовенных древесных пород на постагрогенных землях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 65–76. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-65-76>

Original article

### Formation of Aboveground Phytomass of Deciduous Tree Species on Post-Agrogenic Lands

**Dmitry A. Danilov**<sup>1,2</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [S-7007-2019](https://orcid.org/0000-0002-7504-5743),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7504-5743>

**Artem A. Yakovlev**<sup>1,2</sup>✉, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAR-5081-2021](https://orcid.org/0000-0001-8450-2806),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8450-2806>

**Sergey A. Suvorov**<sup>1</sup>, Teaching Assistant; ResearcherID: [AAC-9497-2022](https://orcid.org/0000-0002-4429-8131),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-8131>

**Ivan A. Krylov**<sup>1</sup>, Employee; ResearcherID: [ADM-9554-2022](https://orcid.org/0000-0001-7122-2418),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7122-2418>

**Sergei A. Korchagov**<sup>3</sup>, Doctor of Agriculture, Director;

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

**Renat S. Khamitov**<sup>4</sup>, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [Z-1461-2018](https://orcid.org/0000-0003-1490-3553),

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

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, lit. U, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; stown200@mail.ru, artem95692@gmail.com✉, sergey\_suvorov1999@mail.ru, diesdthebest@yandex.ru

<sup>2</sup>Leningrad Research Institute for Agriculture “Belogorka”, Branch of the A.G. Lorch Russian Potato Research Centre, ul. Institutskaya, 1, d. Belogorka, Gatchina District, Leningrad Region, 188388, Russian Federation; stown200@mail.ru, artem95692@gmail.com✉

<sup>3</sup>ООО “Vologdalesniktsentr”, ul. Dal’nyaya, 20 d, Vologda, 160000, Russian Federation; kors45@yandex.ru

<sup>4</sup>Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Pankratova, 9 a, korp. 7, s. Molochnoye, Vologda, 160555, Russian Federation; r.s.khamitov@mail.ru

Received on February 11, 2021 / Approved after reviewing on May 16, 2021 / Accepted on May 18, 2021



**Abstract.** The withdrawal of lands from active agricultural use and their overgrowth with woody vegetation have a steady trend in Russia, especially in the boreal zone. Studying the plantations developed on fallow lands of agricultural territories enables estimation of their resource potential for further use. The aboveground phytomass of vegetation is the most reliable indicator of habitat productivity. It is possible to determine the volume of carbon storage by assessing the phytomass of tree and shrub vegetation, which is relevant in the context of global climate change. The study object was a field out of active agricultural use in the Gatchina district of the Leningrad region. A trial area was laid out on the test site, where a complete enumeration of native hardwoods (birch, aspen, tree and shrub willows) with the determination of the basic inventory indicators was carried out. In order to find out the volume of phytomass, from 6 to 8 model trees of each species were cut down. Allometric equations for calculating the fractional composition of phytomass with a high determination coefficient were derived based on the data obtained on the values of individual fractions of the trunk ground part. The accuracy of the derived equations is reduced due to the high variability of crown characteristics in dense deciduous young growth. The highest phytomass is in the trunk part, and the lowest in the assimilation apparatus for all species of woody vegetation. Calculation of aboveground phytomass on the test site according to the obtained equations showed that the highest value per 1 ha at this successional stage is typical for downy birch. Currently, the participation of woody vegetation growing on post-agrogenic lands in carbon sequestration has no reliable full assessment for the study region. Wood that was grown on lands out of active agricultural use can serve as a biofuel source and be harvested in the form of technological chips.

**Keywords:** allometric equations, phytomass, aboveground phytomass, allometric equations for calculating phytomass, deciduous plantations, post-agrogenic lands, Leningrad region

**For citation:** Danilov D.A., Yakovlev A.A., Suvorov S.A., Krylov I.A., Korchagov S.A., Khamitov R.S. Formation of Aboveground Phytomass of Deciduous Tree Species on Post-Agrogenic Lands. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 1, pp. 65–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-65-76>

### Введение

В настоящее время процессы естественного возобновления древесных пород на бывших сельскохозяйственных землях в бореальной зоне России имеют устойчивый характер в связи с экономическими и социальными изменениями [1–3, 5, 13, 15, 17, 22, 23, 25]. На землях, вышедших из сельскохозяйственного пользования, активно идет процесс восстановления аборигенной лесной растительности. Данная тенденция наблюдается во всем мире в зоне умеренного климата, где происходит значительное сокращение земель сельскохозяйственного назначения. Низкоствольная древесина лиственных пород на ранних стадиях сукцессии является хорошим источником технологической щепы.оборот рубки деревьев для получения щепы на постагрогенных землях составляет 10–20 лет [24, 25].

Таким образом, определение надземной фитомассы древесных пород, произрастающих на бывших сельскохозяйственных землях, является актуальной задачей, которая может помочь решить проблему вовлечения древостоев постагрогенных земель в активный хозяйственный оборот. Формируемые насаждения разнообразны по составу и представленности хвойных и лиственных аборигенных пород и, как следствие, имеют различный запас. Знание продуцируемой фитомассы таких насаждений важно как с практической точки зрения –

для дальнейшего хозяйственного использования фитомассы, так и в научном плане – для более точного прогноза и определения возможного депонирования антропогенных выбросов углерода. Фитомасса надземной части древесных растений наиболее полно отражает продуктивность местопроизрастания [23]. Знание величины фитомассы различных фракций позволяет рассчитывать величину депонирования углерода фитоценозами, что является актуальной задачей в условиях глобального изменения климата [9, 14, 18, 20, 21]. Масса древесных растений в большей степени зависит от таких показателей, как объем и плотность древесины, которые в свою очередь являются ее основными качественными характеристиками [8, 10].

Фитомасса молодых древесных растений – показатель, который отражает особенности естественного лесовосстановления за определенный период. Насаждения на постагрогенных землях бореальной зоны в отличие от древостоев, произрастающих на ненарушенных лесных почвах, отличаются более быстрым ростом за счет более мощного бывшего пахотного гумусированного горизонта [1, 14, 16, 21, 26]. Фитомасса древостоя на начальных этапах сукцессии сильно зависит от породного состава насаждения, его возрастной структуры, источника возобновления и почвенных условий произрастания [7, 11].

Следовательно, изучение формирования различных фракций фитомассы на начальных стадиях восстановительной сукцессии позволяет обосновывать и рекомендовать практические методы ведения хозяйства на постагрогенных землях [12].

Количественное выражение важнейших функций лесов как накопителей углерода стало одним из ключевых элементов в понимании глобального углеродного цикла и оказании влияния на него [11]. Поскольку бореальные леса отличаются наиболее медленной скоростью перемещения углерода на этапе от фотосинтеза до освобождения  $\text{CO}_2$  при конечном разложении растительных остатков, то лесному покрову умеренных и северных широт будет отводиться решающая роль в ослаблении парникового эффекта для мировой атмосферы. Поэтому необходимо знать потенциал возможного депонирования углерода на различных стадиях формирования древесных сообществ на данных территориях. Возобновившиеся древесные сообщества на постагрогенных землях могут быть использованы как карбоновые полигоны или фермы.

Цель данной работы – построение регрессионных уравнений для расчета надземной фитомассы различных фракций естественных древостоев на начальной стадии сукцессии на постагрогенных землях.

#### *Объекты и методы исследования*

На постагрогенных землях Гатчинского района Ленинградской области для проведения исследования было выбрано бывшее сельскохозяйственное поле залежью 25 лет. Данный участок характеризуется давней освоенностью: срок сельскохозяйственного пользования поля составлял, вероятно, более 200 лет, что определено на основе карт Царскосельского уезда Петербургской губернии Российской империи конца XVIII в. Поле одним краем примыкает к стене леса. Растительный покров представлен в основном мезотрофными видами. Географические координаты:  $59^{\circ}18'22,33''$  с. ш.  $30^{\circ}6'7,50''$  в. д.

Почвы данного участка сформировались на типичном двучленном наносе (супесь подстиляется красноцветным валунным суглинком). Преобладающим типом почв является альфегумусовый иллювиально-железистый супесчаный постагрогенный глубокопахотный агрозем на валунном суглинке (табл. 1). Средняя мощность бывшего пахотного горизонта составляет 35 см.

Таблица 1

**Морфологическое описание преобладающего типа почв**  
**Morphological description of the prevailing soil types**

Вид почвенного разреза	Индекс	Мощность, см	Описание
	P <sub>pa</sub>	0–33 (35)	Постагрогенный агрогумусовый, светло-серый, комковато-пороховатый, рыхлый, свежий, супесчаный, корни трав, переход волнистый, четкий
	BF	33–51	Иллювиально-железистый, светло-бурый, плитчатый, плотноватый, свежий, супесчаный, железистые дробинки, корни, переход волнистый, постепенный
	C <sub>g</sub>	>51	Почвообразующая порода, красно-бурый, крупно-комковатый, плотный, свежий, оглеенный средний суглинок

Для исследования структуры фитомассы лиственных пород была заложена пробная площадь 20×40 м в наиболее характерном месте для данного заросшего массива и произведен сплошной пересчет древесной растительности. Все деревья на опытном участке обладают высотой более 1,3 м. Кустарниковая ива многоствольная, и характеристики растений брались как среднее значение по всем стволам. Результаты пересчета приведены в табл. 2. Для составления регрессионных уравнений фитомассы было срублено от 6 до 7 модельных деревьев каждой породы (табл. 3).

У каждого модельного дерева отделяли все ветви и устанавливали их массу вместе с листвой. Затем отбирали 3 модельные ветки (из низа, середины и верха кроны) и взвешивали отдельно саму ветвь и ее листья. После проводили повторное взвешивание в абсолютно сухом состоянии. Ствол распиливали и через каждый метр от комля отбирали спицы. Объем ствола рассчитывали как сумму метровых сегментов по формуле объема усеченного конуса и вершины [8].

Таблица 2

**Характеристика древостоя на опытном участке**  
**Characteristics of the stand at the test site**

Порода	$H$ , м	$D$ , см	Запас, м <sup>3</sup> /га	Средний возраст, лет	Численность, экз./га	Средняя $\rho_{\text{баз}}$ , г/см <sup>3</sup>
	среднее					
Береза пушистая	7,707	5,969	36,59	15	2200,0	0,391±0,036
Ива древовидная	5,449	4,154	16,12	10	2462,5	0,371±0,039
Ива кустарниковая	3,562	2,374	22,04	10	1950,0	0,345±0,086
Осина обыкновенная	5,591	3,905	1,15	10	275,0	0,324±0,036

Примечание:  $H$  – высота;  $D$  – диаметр;  $\rho_{\text{баз}}$  – базисная плотность.

Таблица 3

**Характеристика модельных деревьев**  
**Characteristics of model trees**

Модельное дерево		$D$ , см	$H$ , м	$V_{\text{ств}}$ , м <sup>3</sup>	Надземная фитомасса, кг	Масса, кг		
порода	№					ствола	ветвей	листьев
Береза	1	7	10	0,0338	14,3015	12,8935	1,3443	0,0638
	2	12	12	0,1560	74,5568	64,8740	9,3794	0,3034
	3	6	6,5	0,0227	10,5416	7,7930	2,7108	0,0378
	4	3	5	0,0053	3,3337	2,3332	0,9878	0,0127
	5	2	4,5	0,0024	1,7700	0,9506	0,8137	0,0057
	6	2	4,5	0,0028	1,9650	1,0831	0,8687	0,0133
Осина	1	10	7	0,0408	15,7367	13,7208	1,9419	0,0740
	2	10,5	8	0,0627	23,4214	21,7408	1,5971	0,0835
	3	6	4	0,0117	4,6754	3,8138	0,8417	0,0199
	4	8	4	0,0157	5,0937	4,4589	0,6113	0,0235
	5	8,5	8	0,0391	13,2064	11,8516	1,3272	0,0276
	6	6	4	0,0108	4,6179	3,7663	0,8323	0,0193
	7	5	3	0,0040	2,5920	1,2729	1,2861	0,0329
Ива (древесная форма)	1	5	6	0,0156	8,8524	6,5437	2,2565	0,0521
	2	6	5	0,0130	5,6194	5,0908	0,5122	0,0165
	3	6	5	0,0198	9,3267	6,9182	2,3621	0,0465
	4	5	5	0,0115	5,6503	4,1665	1,4196	0,0643
	5	4	3	0,0026	1,5932	0,7775	0,7937	0,0220
Ива (кустарнико- вая форма)	1	6,5	8	0,0474	21,8532	17,3472	4,3042	0,2018
	2	5,5	6	0,0271	12,8140	9,8640	2,8431	0,1070

Примечание:  $V_{\text{ств}}$  – объем ствола.



Для каждого спила определяли базисную плотность древесины на высечках по рекомендациям О.И. Полубояринова методом максимальной влажности образцов по формуле [6]:

$$\rho_{\text{баз}} = \frac{1}{\frac{m_w}{m_0} - 0,346},$$

где  $m_w$  – масса образца предельно насыщенного влагой, г;  $m_0$  – масса абсолютно сухого образца, г.

Массу абсолютно сухой древесины, кг, определяли по формуле

$$m = \frac{V \rho_{\text{баз}}}{1000},$$

где  $V$  – объем древесины, м<sup>3</sup>.

Далее рассчитывали фитомассу  $W_d$ , кг, всей надземной части дерева и отдельно по фракциям (ствол, ветви и листья). Поиски коэффициентов регрессионных уравнений для перечисленных фракций фитомассы (абсолютно сухое состояние) производили в зависимости от диаметра и высоты с использованием уравнения Маркклунда:

$$W_d = \exp\left(b_0 + \frac{b_1 D}{D + g} + b_2 H + b_3 \ln H\right),$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3, g$  – коэффициенты регрессионного уравнения [4, 19].

При составлении уравнений использовали процедуру нелинейной множественной регрессии статистического пакета Statgraphics Centurion 18 (метод оптимизации – алгоритм Левенберга–Марквардта).

Для оценки влияния различных параметров на фитомассу было рассчитано значение корреляции по Пирсону:

$$r_{xy} = \frac{\sum(d_x d_y)}{\sqrt{(\sum d_x^2 \cdot \sum d_y^2)}},$$

где  $d_x$  и  $d_y$  – отклонение от среднего арифметического каждого показателя соответственно.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Установление аллометрических закономерностей фракционного состава фитомассы деревьев в зависимости от диаметра и высоты требует оценки влияния различных параметров и массы фракций на общую фитомассу и друг на друга. В табл. 4 приводятся значения корреляционного индекса Пирсона для диаметра, высоты и фракционного состава фитомассы. Из данных табл. 4 видно, что высота имеет значительную положительную связь с диаметром, фитомассой ствола и всей надземной части дерева. Заметная связь высоты наблюдается также с массой ветвей и листьев. Диаметр деревьев по сравнению с высотой в целом характеризуется более сильной корреляцией со всеми другими параметрами. Данная закономерность связана с большей вариабельностью диаметров деревьев в насаждении в отличие от их высот. Самая низкая корреляция для показателей диаметра деревьев отмечена с массой ветвей. Различные фракции фитомассы между собой показывают достаточно сильную корреляционную связь.



Таблица 4

**Индекс корреляции Пирсона для фракций фитомассы и основных  
таксационных показателей**  
**The Pearson correlation coefficient for phytomass fractions and basic inventory  
indicators**

Таксационный показатель / фракция	<i>h</i> , м	<i>d</i> , см	Ствол	Ветви	Листья	Общее
			кг			
<i>h</i> , м	1					
<i>d</i> , см	0,8168	1				
Ствол, кг	0,7621	0,8608	1			
Ветви, кг	0,5148	0,7811	0,9150	1		
Листья, кг	0,5666	0,8205	0,8999	0,9444	1	
Общее, кг	0,7381	0,8591	0,9987	0,9344	0,9145	1

В табл. 5 приводятся значения коэффициентов регрессионных уравнений Марклунда и коэффициентов детерминации ( $R^2$ ). Полученные уравнения в большинстве случаев имеют высокую степень аппроксимации выборки имеющегося фактического материала (высокое значение  $R^2$ ). Наиболее низкий коэффициент детерминации наблюдается для уравнений фитомассы листьев ивы, что связано с сильной неоднородностью размера кроны в густом возобновлении древесных пород. У ивы в основном отмечено понижение коэффициента для всех фракций фитомассы, так как есть 2 формы – кустарниковая и древовидная. Вероятно, это вызвано сильной конкуренцией за фотосинтетические ресурсы с остальными элементами древостоя, что косвенно подтверждается наиболее низкой корреляцией высоты с фитомассой ветвей и листьев. Однако в целом стоит отметить высокую точность аппроксимации у полученных уравнений.

Таблица 5

**Коэффициенты регрессионных уравнений Марклунда для массы фракций (а.с.с.)  
березы, осины и ивы в зависимости от диаметра и высоты деревьев**  
**Coefficients of the Marklund's regression equations for the mass fraction ( $W_d$ , kg;  
absolutely dry weight) of birch, aspen, and willow as a function of tree diameter (*d*, cm)  
and height (*h*, m)**

Порода	Фракция фитомассы	Коэффициент регрессионного уравнения					
		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$g$	$R^2$
Береза	Надземная	1,0432	13,9788	0,1671	-1,5665	20,5363	0,99
	Ствол	-1,5532	9,9175	0,1834	-0,1699	18,1578	0,99
	Ветви	-0,6039	0	-0,0064	-0,2305	0,0001	0,86
	Листья	-6,4172	-174,055	-0,0449	0,9021	-605,142	0,99
Осина	Надземная	2,48474	-1,74951	0,22698	0,156	-1,43688	0,89
	Ствол	-1,0574	-0,0023	0,28817	0,43528	-3,9799	0,81
	Ветви	3,4099	5,0049	0,8965	-6,9744	1,5284	0,79
	Листья	-0,8802	3,8659	1,4811	-8,9584	-0,1928	0,87
Ива	Надземная	-26,8052	-940,039	-6,3204	36,0197	-2125,34	0,89
	Ствол	-5,5016	0	-0,9244	6,2402	0	0,87
	Ветви	-3,4281	12,3548	-0,5018	2,3303	18,0058	0,79
	Листья	-50,9632	9407,88	-11,0838	61,6926	12693,2	0,71

В табл. 6 показаны значения фитомассы лиственных пород по результатам перечета пробной площади и в пересчете на 1 га. Наибольшей общей фитомассой на 1 га обладает береза, а наименьшей – ива древовидная. Сравнивая полученные данные, можно отметить, что общая надземная фитомасса по сумме фракций (ствол, ветви, листья) по сравнению с рассчитанной по уравнению для березы и ивы древовидной имеет значения соответственно на 14 и 23 % ниже, для осины и ивы кустарниковой – соответственно на 35 и 62 % выше. Такие результаты связаны с естественным отсутствием аддитивности фракционного состава фитомассы.

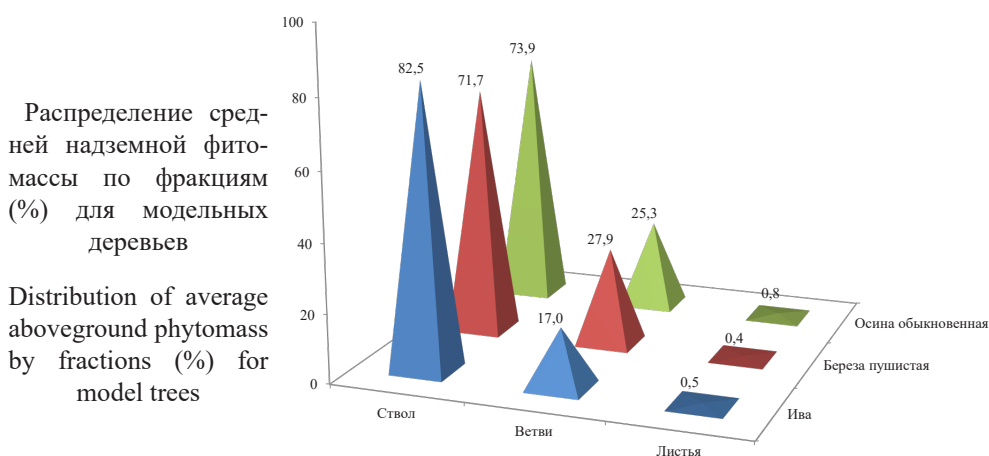
Таблица 6

**Значения фракций надземной фитомассы (кг) лиственных пород**  
**Calculated values of aboveground phytomass fractions (kg) of deciduous species**

Фитомасса	Древесная порода			
	Береза	Осина	Ива	
			древесная форма	кустарниковая форма
Надземная	3415,69	93,92	479,90	87,27
	42696,13	1174,00	5998,75	1090,88
Ствол	2836,88	95,92	155,36	69,24
	35461,00	1199,00	1942,00	865,50
Ветви	60,17	29,86	212,34	71,64
	752,13	373,25	2654,25	895,50
Листья	14,52	0,65	1,99	0,25
	181,50	8,13	24,88	3,13

Примечание: Верхняя строка – значения для пробной площади; нижняя – для 1 га.

На рисунке приведены данные по процентному распределению надземной фитомассы по фракциям. Наиболее высокий процент массы приходится на ствол у ивы, минимальный – у березы. Максимальной фитомассой ветвей обладает береза, а минимальной – ива. Для всех пород на исследуемом участке характерна незначительная фитомасса листьев (менее 1 %). Максимальная масса листьев отмечена у осины, практически одинакова их масса у березы и ивы.



Почти вся надземная фитомасса исследуемых древесных растений сконцентрирована в одревесневших органах (ствол и ветви), ассимиляционный аппарат вносит малый вклад в формирование надземной фитомассы. Таким образом, древесную растительность, выросшую на старопахотных землях, возможно использовать для производства технологической или топливной щепы с оборотом рубки 10–20 лет.

#### Заключение

Построенные аллометрические уравнения для расчета различных фракций надземной фитомассы в целом обладают высокими точностью и коэффициентом детерминации. Уравнения для ивы характеризуются более низкой точностью из-за высокой вариабельности биометрических показателей данной породы.

Полученные уравнения позволяют производить расчеты фракционного состава надземной фитомассы лиственных пород на землях, вышедших из сельскохозяйственного оборота, как для экологических, так и для производственных целей. Полученная предварительная оценка запасов наземной фитомассы может быть использована для расчета депонируемого углерода на постагrogenных землях региона исследования.

Данная работа носит пионерный характер для региона и требует проведения дальнейших исследований в целях создания базы данных по количественным и качественным характеристикам насаждений, формируемых на постагrogenных землях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Грибов С.Е., Корчагов С.А., Хамитов Р.С., Евдокимов И.В. Производительность древостоев, сформировавшихся на землях сельскохозяйственного назначения // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 19–25.  
Gribov S.E., Korchagov S.A., Khamitov R.S., Evdokimov I.V. Productivity of Stands Formed on Agricultural Lands. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 19–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-19-25>
2. Данилов Д.А., Шестаков В.А., Шестакова Т.А., Эндерс О.О. Сукцессионные стадии восстановления древесной растительности на постагrogenных землях Ленинградской области // Изв. СПбЛТА. 2020. Вып. 233. С. 60–80.  
Danilov D.A., Shestakov V.I., Shestakova T.A., Enders O.O. Successional Stages of Restoration of Woody Vegetation on Postagrogenic Lands of the Leningrad Region. *Izvestia sankt-peterburgskoj lesotehniceskoy akademii*, 2020, iss. 233, pp. 60–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.233.60-80>
3. Карпин В.А., Петров Н.В., Туунен А.В. Восстановление лесных фитоценозов после различных видов сельскохозяйственного использования земель в условиях среднегаежной подзоны // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 120–129.  
Karpin V.A., Petrov N.V., Tuunnen A.V. Regeneration of Forest Phytocoenoses After Various Agricultural Land Use Practices in the Conditions of Middle Taiga Subzone. *Sibirskij Lesnoj Zurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 6, pp. 120–129. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170610>
4. Комаров А.С., Чертов О.Г., Надпорожская М.А., Припутина И.В., Быховец С.С., Ларионова А.А., Грабарник П.Я., Зудин С.Л., Михайлов А.В., Зубкова Е.В., Зудина Е.В., Шанин В.Н., Андриенко Г., Андриенко Н., Мартынкин А.В., Морен Ф., Абакумов Е.В., Лукьянов А.М., Кубасова Т.С., Бахатти Дж., Шоу С., Аннс М., Бобровский М.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э., Глухова Е.М. Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах. М.: Наука, 2007. 380 с.

Komarov A.S., Chertov O.G., Nadporozhskaya M.A., Pripulina I.V., Bykhovets S.S., Larionova A.A., Grabarnik P.Ya., Zudin S.L., Mikhaylov A.V., Zubkova E.V., Zudina E.V., Shanin V.N., Andriyenko G., Andriyenko N., Martynkin A.V., Moren F., Abakumov E.V., Luk'yanov A.M., Kubasova T.S., Bakhatti Dzh., Shou S., Apps M., Bobrovskiy M.V., Khani-na L.G., Smirnov V.E., Glukhova E.M. *Modeling the Dynamics of Organic Matter in Forest Ecosystems*. Moscow, Nauka Publ., 2007. 380 p. (In Russ.).

5. Новикова М.А., Грязькин А.В., Беляева Н.В., Хетагуров Х.М., Нгуен В.З. Формирование лесных фитоценозов на заброшенных землях сельскохозяйственного назначения // Аграр. науч. журн. 2016. № 6. С. 29–33.

Novikova M.A., Gryazkin A.V., Belyaeva N.V., Hetagurov Kh.M., Nguyen V.Z. The Formation of Forest Communities on Abandoned Agricultural Lands. *Agrarian Scientific Journal*, 2016, no. 6, pp. 29–33. (In Russ.).

6. Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.

Poluboyarinov O.I. *Density of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p. (In Russ.).

7. Пристова Т.А. Фитомасса древесных растений в лиственных фитоценозах послерубочного происхождения // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 1. С. 5–13.

Pristova T.A. Phytomass of Woody Plants in Post-Harvest Origin Deciduous Forests. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 5–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-1-5-13>

8. Родин Л.Е., Ремезов Н.П., Базилевич Н.И. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1968. 143 с.

Rodin L.E., Remezov N.P., Bazilevich N.I. *Methodological Guidelines for the Study of Dynamics and Biological Cycle in Phytocenoses*. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 143 p. (In Russ.).

9. Сергиенко В.Г. Влияние ожидаемого изменения климата на баланс углерода и продуктивность экосистем в лесном секторе Российской Федерации // Тр. СПбНИИЛХ. 2018. № 1. С. 74–90.

Sergienko V.G. The Expected Impact of Climate Change on Carbon Balance and Ecosystem Productivity in the Forest Sector of the Russian Federation. *Proceedings of the Saint-Petersburg Forestry Research Institute*, 2018, no. 1, pp. 74–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2018.1.74>

10. Усольцев В.А., Усольцев А.В. Регрессионная модель предельных показателей фитомассы сосновых древостоев // Изв. вузов. Лесн. журн. 2001. № 1. С. 7–14. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/164/1646d127147cadaf3e54397b2a8838ea.pdf>

Usoltsev V.A., Usoltsev A.V. Regression Model of Limiting Phytomass Indices of Pine Stands. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2001, no. 1, pp. 7–14. (In Russ.).

11. Усольцев В.А., Цепордей И.С. Квалиметрия фитомассы лесных деревьев: плотность и содержание сухого вещества. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 178 с.

Usoltsev A.V., Tsepordey I.S. *Qualimetry of Phytomass of Forest Trees: Density and Dry Matter Content*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 178 p. (In Russ.).

12. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы, осины в европейской части России // Лесоведение. 1996. № 6. С. 36–46.

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gulbe T.A., Gulbe Ya.I. Allometric Equations for Phytomass Based on the Data on Pine, Spruce, Birch and Aspen Trees in European Russia. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1996, no. 6, pp. 36–46. (In Russ.).

13. Феклистов П.А., Турикова Т.В., Аверина М.В. Роль типов леса в смене пород на старопашотных землях Кенозерского национального парка // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2016. Т. 20, № 6. С. 39–43.

Feklistov P.A., Turikova T.V., Averina M.V. The Role of Forest Types in the Change of Species to Cultivated Lands of Kenozero National Park. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2016, vol. 20, no. 6, pp. 39–43. (In Russ.).

14. Danilov D.A., Shestakova T.A., Shestakova V.I., Anders O.O., Ivanov A.A. The Effect of Living Ground Cover on the Development of the Young Generation of Tree Species on Post-Agrogenic Lands of the Boreal Zone. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, no. 574, art. 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/574/1/012015>
15. Domke G.M., Woodall C.W., Smith J.E., Westfall J.A., McRoberts R.E. Consequences of Alternative Tree-Level Biomass Estimation Procedures on U.S. Forest Carbon Stock Estimates. *Forest Ecology and Management*, 2012, vol. 270, pp. 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.01.022>
16. Grădinaru S.R., Kienast F., Psomas A. Using Multi-Seasonal Landsat Imagery for Rapid Identification of Abandoned Land in Areas Affected by Urban Sprawl. *Ecological Indicators*, 2019, vol. 96, part 2, pp. 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.022>
17. Kukuļs I., Kļaviņš M., Nikodemus O., Kasparinskis R., Brūmelis G. Changes in Soil Organic Matter and Soil Humic Substances Following the Afforestation of Former Agricultural Lands in the Boreal-Nemoral Ecotone (Latvia). *Geoderma Regional*, 2019, vol. 16, art. e00213. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00213>
18. Mahajan V., Choudhary P., Raina N.S., Sharma P. Carbon Sequestration Potential of Trees in Arable Land-Use and Allometric Modelling for Dominant Tree Species in Sub-Tropics of Jammu and Kashmir. *Journal of Environmental Biology*, 2021, vol. 42, no. 2, pp. 414–419. [https://doi.org/10.22438/jeb/42/2\(SI\)/SI-245](https://doi.org/10.22438/jeb/42/2(SI)/SI-245)
19. Marklund L.G. *Biomass Functions for Pine, Spruce and Birch in Sweden*. Report 45. Umea, Swedish University of Agricultural Sciences, 1988. 73 p.
20. Nogueira F.C.B., Dobe E.K., Silva Filho J.B., Rodrigues L.S. Allometric Equations to Estimate Aboveground Biomass of *Dalbergia cearensis* Species in the Brazilian Seasonally Dry Tropical Forest. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 484, art. 118920. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118920>
21. Ovsepyan L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Ya. Recovery of Organic Matter and Microbial Biomass After Abandonment of Degraded Agricultural Soils: The Influence of Climate. *Land Degradation & Development*, 2019, vol. 30, iss. 15, pp. 1861–1874. <https://doi.org/10.1002/ldr.3387>
22. Pothong T., Elliott S., Chairuang Sri S., Chanthorn W., Shannon D.P., Wangpakattananawong P. New Allometric Equations for Quantifying Tree Biomass and Carbon Sequestration in Seasonally Dry Secondary Forest in Northern Thailand. *New Forests*, 2022, vol. 53, pp. 17–36. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09844-3>
23. Segura C., Navarro F.B., Jiménez M.N, Fernández-Ondoño E. Implications of Afforestation vs. Secondary Succession for Soil Properties Under a Semiarid Climate. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 704, art. 135393. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135393>
24. Tabacchi G., Di Cosmo L., Gasparini P. Aboveground Tree Volume and Phytomass Prediction Equations for Forest Species in Italy. *European Journal of Forest Research*, 2011, vol. 130, iss. 6, pp. 911–934. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0481-9>
25. Volkova I., Solodunov A., Kondratenko L. Composition and Structure of Regrowth Forests on Abandoned Agricultural Land. *Journal of Forest Science*, 2020, vol. 66, pp. 436–442. <https://doi.org/10.17221/100/2020-JFS>
26. Zethof J.H.T., Cammeraat E.L.H., Nadal-Romero E. The Enhancing Effect of Afforestation Over Secondary Succession on Soil Quality Under Semiarid Climate Conditions. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 652, pp. 1090–1101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.235>

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

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



Научная статья

УДК 581.526.42(262.54)

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-77-87

## Состояние защитных лесных насаждений Азовского побережья Краснодарского края

Н.В. Примаков<sup>1,2</sup>, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABD-8930-2021](https://orcid.org/0000-0001-9225-024X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-024X>

<sup>1</sup>Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, д. 149, г. Краснодар, Россия, 350040; [nik-primakov@yandex.ru](mailto:nik-primakov@yandex.ru)

<sup>2</sup>Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, Россия, 350044

Поступила в редакцию 30.01.21 / Одобрена после рецензирования 05.05.21 / Принята к печати 11.05.21

**Аннотация.** Литоральные ландшафты являются слабоустойчивыми и легко разрушающимися экологическими системами ввиду своего природного происхождения. Такие ландшафты из-за своей привлекательности подвергаются антропогенному воздействию и, не обладая значительной способностью к восстановлению, оказываются особо чувствительными к данным нагрузкам. Исследования проводились в районе г. Темрюк Темрюкского района Краснодарского края на полосе побережья Азовского моря. Перед выбором мест для закладки пробных площадей в лесных полосах из лоха узколистного (*Elaeagnus angustifolia*) были проложены рекогносцировочные маршруты. Выбирались типичные участки с характерным естественным состоянием изучаемого насаждения. Посадки лоха узколистного произведены в 50–60-х гг. XX в. Эти сообщества имеют искусственное происхождение. Рассматривается возможность защиты лесными насаждениями берегов Азовского моря от разрушения, абразии, нагонной волны на примере лесных полос из лоха узколистного. Цель исследования – изучение состояния защитных лесных насаждений на побережье Азовского моря, определение их экосистемной роли, возможности выполнения ими защитных функций и разработка мероприятий, направленных на улучшение состояния насаждений. Установлено, что по причине антропогенной нагрузки произошло изреживание деревьев – от 9 до 33 %, отмечены их гибель и вегетативное возобновление. В результате частичного изреживания древесных пород в составе защитной лесной полосы перераспределился ветровой поток и увеличилась освещенность почвы. Лесные насаждения могут выполнять защитные функции и являются важным компонентом в защитном комплексе берегов Азовского побережья. В целом исследованные лесные насаждения имеют удовлетворительное состояние, хотя местами отмечена обратная ситуация, в том числе и полное изреживание деревьев, рядов и участков. Лесному хозяйству региона с целью восстановления и сохранения защитных лесных насаждений побережья рекомендуется ограничение рекреационной нагрузки на них, своевременное проведение в насаждениях агротехнических уходов и – в зависимости от степени сохранности лесополос и обилия возобновления – их полная или частичная реконструкция.

**Ключевые слова:** абразия, нагонная волна, защита берегов, лесные насаждения, защитные лесные насаждения, антропогенное воздействие, состояние лесных полос, таксационные характеристики, выпадения деревьев, Азовское побережье, Краснодарский край

*Для цитирования:* Примаков Н.В. Состояние защитных лесных насаждений Азовского побережья Краснодарского края // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-77-87>

Original article

### The State of Protective Forest Plantations on the Azov Coast of Krasnodar Krai

*Nikolay V. Primakov*<sup>1,2</sup>, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABD-8930-2021](https://orcid.org/0000-0001-9225-024X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9225-024X>

<sup>1</sup>Kuban State Agrarian University, ul. Stavropol'skaya, 149, Krasnodar, 350040, Russian Federation; [nik-primakov@yandex.ru](mailto:nik-primakov@yandex.ru)

<sup>2</sup>Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, ul. Kalinina, 13, Krasnodar, 350044, Russian Federation

Received on January 30, 2021 / Approved after reviewing on 5 May, 2021 / Accepted on 11 May, 2021

**Abstract.** The littoral zones are unstable and easily destroyed ecological systems due to the natural origin. The coastal landscapes are usually attractive to human activities. Thus, the environment of such areas is particularly sensitive to anthropogenic impact and has low ability for recovery. The research was made on the Azov coast near the town of Temryuk in Krasnodar Krai. The choice of the trial areas in the forest belts for plantation of Oleaster or Russian olive (*Elaeagnus angustifolia*) was preceded by the construction of the reconnoitering routes. The average areas with the characteristic natural state of the examined vegetation were selected. Oleaster was primary planted in the 1950s and 1960s. These tree assembles have artificial origin. The article considers the possibility of protecting by afforestation the coastal line of the Sea of Azov from destruction, abrasion, surge waves. That forest ranging can be made, as an example, by Russian olive. The goals of the research were to investigate the state of the protective forest plantings on the coast of the Sea of Azov, to determine the role of the plantings in the ecosystem, to evaluate the protective potential and to develop the measures for improvement the condition of the plants. The results of the research showed that the anthropogenic influence created the tinning by suppression of the trees from 9 to 33 %. The extinction of the flowerage and vegetative regeneration were also indicated. As a result of partially tinning of the wood species in the protective areas the wind flow was redistributed, and the illumination of the soil was increased. The forest belts have the protective purpose and are an important component of the resisting barrier for the shorelines of the Sea of Asov. In general, the tested forest territories have a suitable condition. Although, the depletion process was observed for single plant species as well as for the planted rows. Some of the sections were totally woodless. The forestry administration of the region should protect and preserve the forest areas. It is recommended to reduce the recreational load on the forest belts, to provide regularly agrotechnical care for the plants and to afforest the territories partially or totally depending on the quality conditions.

**Keywords:** abrasion, surge wave, coastal protection, forest plantings, protective forest belts, anthropogenic impact, condition of forest belts, forest inventory characteristics, tree loss, Azov coastline, Krasnodar Krai

**For citation:** Primakov N.V. The State of Protective Forest Plantations on the Azov Coast of Krasnodar Krai. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 77–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-77-87>





*Введение*

В последнее время из-за отрицательного воздействия природной среды и процессов техногенеза увеличивается скорость обрушения берегов Азовского моря [3, 4, 6, 10, 14]. Зафиксирован рост абразионных процессов, особенно в местах, где не происходит гашения штормовых и нагонных волн. Оползни, обвалы и осыпи в таких условиях широко распространены. На обрывистые части берегов негативно влияют эрозия, дефляция и другие процессы в пределах береговой линии. Особенно сильному размыву подвергаются пляжные участки, песчаные косы, продукты намыва и отложений. Динамичные процессы подъема и опускания вод Мирового океана заметно увеличивают площади разрушенных берегов, уничтожают растительность этих участков [2, 16, 18].

Литоральные ландшафты являются слабоустойчивыми и легко разрушающимися экологическими системами ввиду своего природного происхождения [1, 5, 7, 12, 19]. Такие ландшафты из-за своей привлекательности подвергаются антропогенному воздействию. Не обладая значительной способностью к восстановлению, они оказываются особо чувствительными к такого рода нагрузкам. Факторами основного негативного воздействия становятся высокое рекреационное воздействие на песчаные косы, нерегулируемый поток туристов, застройка на побережье, изъятие песка из прибрежной зоны и русел малых рек побережья, загрязнение нефтепродуктами, пожары, интенсивный рыбный промысел, разведка и добыча углеводородного сырья в прибрежных зонах и др.

Изучение данной проблемы связано с разработкой комплекса мероприятий по рациональному освоению, бережному использованию и укреплению береговой части Азовского моря для защиты от последствий абразивных процессов, нагонной волны и размыва (рис. 1), защиты литоральных экосистем, прилегающих сельскохозяйственных угодий, естественных участков степи.



Рис. 1. Размыв берегов Азовского побережья (Вербяная коса)

Fig. 1. Erosion of the Azov coastline (Verbyana Spit)

Недостаток информации по изучаемым вопросам, отсутствие ее систематизации и обобщения не позволяют сделать четкие выводы и выдвинуть научно-обоснованные предложения. Это касается лесомелиоративных работ по защите и укреплению берегов. Решение проблемы только с точки зрения гидротехнических сооружений не дало должного эффекта, а лишь немного отодвинуло во временном плане разрушение берегов. Учет и оценка роли лесомелиоративной составляющей прибрежного комплекса в борьбе с данными негативными процессами на протяжении нескольких последних десятилетий в районе исследований не проводились.

*Объекты и методы исследования*

Азовское море – самое небольшое по площади и неглубокое море в Российской Федерации. Оно занимает территорию 37 800 км<sup>2</sup>. Его средняя глубина – 8 м, максимальная – 14 м, преимущественно встречающаяся – 5 м [9]. В Краснодарском крае на побережье Азовского моря образовались косы Чушка, Вербяная, Долгая, Камышеватская, Глафиоровская, Ясенская, Ачуевская и др. В этой части Кубани встречаются плавни, лиманы, заливы и косы.

Исследование проводилось в 2016–2019 гг. на Вербяной косе. Ее протяженность – около 15 км. Она расположена недалеко от г. Темрюк, координаты – 45°22'34" с. ш 37°3'24" в. д. Цель исследования – изучение состояния защитных лесных насаждений на побережье Азовского моря, определение их экосистемной роли, возможности выполнения ими защитных функций и разработка мероприятий, направленных на улучшение состояния насаждений.

Перед выбором мест для закладки пробных площадей (ПП) в защитных лесных полосах были проложены рекогносцировочные маршруты, а затем определены типичные места. Исследованный участок (рис. 2) визуально можно разделить на 3 части – 3 пробные площади.

ПП 1 лежит по правую сторону от Куликовского гирла, площадь участка – 3015,84 м<sup>2</sup>. Лесная полоса плотной конструкции состоит из 6 рядов, возраст насаждения – 56 лет, расстояние между деревьями – 4 м, в ряду – 2 м. Главная древесная порода – лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia* L.). Из кустарников присутствуют аморфа кустарниковая (*Amorpha fruticosa* L.), единично – роза собачья (*Rosa canina* L.). Расстояние от крайнего ряда лесной полосы до уреза воды Азовского моря колеблется от 5 до 7 м. Данная ПП в меньшей степени по сравнению с остальными испытывала антропогенное воздействие – лишь около 15 % территории нарушено рубками.

ПП 2 расположена по левую сторону от Куликовского гирла, площадь участка составляет 2009,40 м<sup>2</sup>. Лесная полоса ажурной конструкции образована 6 рядами, возраст насаждения – 56 лет, расстояние между деревьями и в ряду – 4 и 2 м соответственно. Лох узколистный является главной древесной породой. Присутствует аморфа кустарниковая, единично встречается тамарикс четырехтычинковый (*Tamarix tetrandra* Pall.). Расстояние от крайнего ряда лесной полосы до уреза воды Азовского моря – 7–10 м. ПП испытывала антропогенное воздействие – около 25 % участка нарушено рубками.

ПП 3 занимает территорию 116 568,00 м<sup>2</sup> по левую сторону от Куликовского гирла, за ПП 2. Продуваемая лесная полоса состоит из 6 рядов, возраст насаждения – 56 лет, расстояние между деревьями – 4 м. Древесные и кустарниковые породы те же, что и на ПП 1: главная древесная порода – лох узколистный, встречаются аморфа кустарниковая и – единично – роза собачья. Расстояние от крайнего ряда лесной полосы до уреза воды колеблется от 6 до 9 м. Рассматриваемая площадь имела более высокое антропогенное воздействие по сравнению с ПП 1 и 2 – более 60 % насаждений нарушено рубками.

Временные ПП закладывались по ОСТ 56-69–83. При этом принимались во внимание особенности таксации лесных полосных насаждений. По таксационным данным рассчитывались средние высоты и диаметры растений в насаждениях. На каждой ПП произрастало не менее 200 деревьев основной породы. Методом сплошного перечета определялось количество стволов на 1 га.

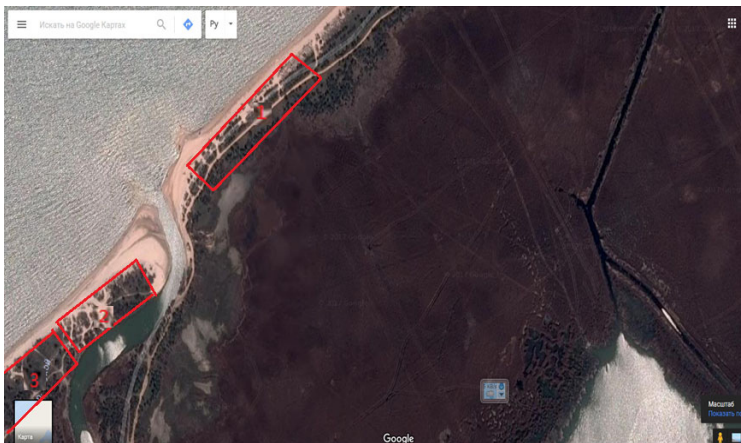


Рис. 2. Расположение пробных площадей 1–3 для изучения состояния лесных полос (Google Карты, 2020)

Fig. 2. Position of the trial areas No. 1–3 for studying the condition of forest belts (Google Maps, 2020)

Устанавливалось происхождение главных и встречающихся древесных и кустарниковых пород, их возраст, вид лесополос и состав насаждений. Геоботаническое описание на ПП 2 и 3 проводилось по общепринятой методике [11], с определением полного флористического состава, обилия, жизнеспособности и возобновления каждого вида. Для изучения возобновления древесных пород на каждой ПП выделялось не менее 10 учетных площадок  $2 \times 2$  м.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Азовское побережье в местах исследований до того, как сфера туризма получила здесь активное развитие, было защищено от нагонной волны валом из ракушечника высотой от 0,5 до 2,5 м и лесными полосными насаждениями из лоха узколистного. Ширина полос колебалась от 5 до 24 м. С развитием дорожной сети и рекреационных объектов возрастала антропогенная нагрузка на территорию, как на литоральные экосистемы, так и на защитные лесные насаждения. Ширина лесных полос снизилась до минимума, а в некоторых местах наблюдались участки протяженностью от 7 до 50 м, где насаждения отсутствовали. Вал, представленный на рис. 3, недолговечный и служил для защиты берега лишь несколько лет, по истечении этого времени подвергаясь смыву и размыву волной со стороны моря.

Рис. 3. Вал из ракушечника, защищающий прибрежные территории от нагонной волны

Fig. 3. Protection of coastal landscapes and roads from surge waves with a limestone shaft



Рядом ученых [8, 13, 15, 17, 20] установлено, что характеристики почвы образований в районе исследований в основном зависят от типа растительности и волновых явлений (сгонно-нагонных). Наиболее благоприятные условия для почвообразования наблюдаются под древесно-кустарниковыми лохово-аморфными сообществами, что объясняется лучшей закрепленностью субстрата корнями древесно-кустарниковых растений.

Растительность исследуемой территории представлена несколькими типами сообществ: литоральные плавни с доминированием тростниковых; литоральная растительность на песчаных и ракушечных экотопах; древесно-кустарниковые сообщества; песчаные литоральные степи. Растительный покров здесь имеет сложную структуру. Дополнительными сообществами в большинстве типов растительности являются тростниковые.

В районе исследований отмечаются редкие виды растений и растения, занесенные в Красную книгу Российской Федерации и Красную книгу Краснодарского края: кендырь сарматский, мачок желтый, молочай прибрежный, катран морской, синеголовник морской и др. Для всех перечисленных растений характерны статусы «уязвимые» и «подлежащие охране». Также значительную часть прибрежной зоны занимают лоховые сообщества (рис. 4). Посадки лоха узколистного на ПП 1 были произведены в 50–60-х гг. прошлого века. Насаждение имеет удовлетворительное состояние, средний диаметр деревьев в нем – 13 см, средняя высота – 3,44 м. Характеристика древесных сообществ лоха узколистного на данной ПП представлена в табл. 1.



Рис. 4. Защитные лесные полосы из лоха узколистного (Вербяная коса)

Fig. 4. Protective forest belts of Oleaster (Verbyana Spit)

На ПП 1 по средним высотам и диаметрам выделены 4 группы высоты. Поскольку лесная полоса была подвержена антропогенному воздействию, мы можем наблюдать изреживание лесной полосы, гибель части древостоя и вегетативное возобновление деревьев и кустарников. В результате частичного выппада древесных пород в лесной полосе из лоха узколистного увеличилась освещенность почвы и произошло перераспределение ветрового потока. Исследуемые участки покрылись травянистой растительностью, при этом наблюдается проникновение на территорию лесных полос как краснокнижных растений (катран морской, синеголовник морской и др.), так и представителей луговых ценозов и агроценозов.



Таблица 1

**Характеристика ценоза лоха узколистного на ПП 1 (Вербяная коса, 2019 г.,  
площадь учета 3015,84 м<sup>2</sup>)**  
**Characteristics of Oleaster's cenosis on the trial area No. 1 (Verbyana Spit, 2019,  
the inventory area is 3015.84 m<sup>2</sup>)**

Группа высоты	Ярус	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр ствола, см	Бонитет	Количество стволов, шт.
1	Верхний	56	2,00–2,94	5,00–10,24	IV	81
2			2,95–3,89	10,25–15,49	IV	155
3			3,90–4,84	15,50–20,74	III	50
4			4,85–5,80	20,75–26,00	III	23

Среднее количество стволов деревьев лоха узколистного на ПП 1 составляет 309. Их распределение по группам высоты неодинаковое. Наименьшее количество деревьев (23) было отмечено в 4-й группе высоты. Они имели семенное происхождение и максимальные показатели роста по высоте и диаметру. Наибольшее количество деревьев (155) характерно для 2-й группы высоты, для деревьев, имеющих вегетативное происхождение и незначительные показатели роста. Средняя сохранность древостоя в данном варианте опыта – 78 %.

Из данных табл. 2, в которую сведены результаты геоботанических исследований, проведенных на ПП 2 и 3, следует, что лучшие показатели роста лоха узколистного отмечаются на ПП 2, где, несмотря на более высокую рекреационную нагрузку на насаждение, хорошо просматриваются ряды растений при их средней сохранности 65 %. На ПП 3 встречаются только «островки» насаждения при его средней сохранности 27 %, что связано в том числе со строительством вала и дороги.

Таблица 2

**Характеристика ярусов растительного покрова на ПП 2 и 3**  
**Characteristics of vegetation stages on the trial areas No. 2 and 3**

Ярус	Высота, м	Преобладающий вид
<i>ПП 2</i>		
Верхний (древесный)	5,0	Лох узколистный
Средний (кустарниковый)	2,4	Аморфа кустарниковая
Нижний (травянистый)	0,5	Леймус песчаный ( <i>Leymus sabulosus</i> Bied)
<i>ПП 3</i>		
Верхний (древесный)	4,0	Лох узколистный
Средний (кустарниковый)	2,6	Аморфа кустарниковая
Нижний (травянистый)	0,9	Люцерна степная ( <i>Medicago romanica</i> Prod)

Важным для продления срока службы лесных полос является естественное возобновление. Нами выполнена оценка вегетативного возобновления по вариантам опыта в лесных полосах, состоящих из лоха узколистного и аморфы кустарниковой (рис. 5, табл. 3). Наибольшее количество возобновления изученных древесных пород отмечено на ПП 2 (среднее на площади – 4 м<sup>2</sup>), где была проведена частичная вырубка деревьев. Наличие вегетативного возобновления в лесных полосах свидетельствует о возможности продления срока службы таких насаждений приемами возобновительных рубок.

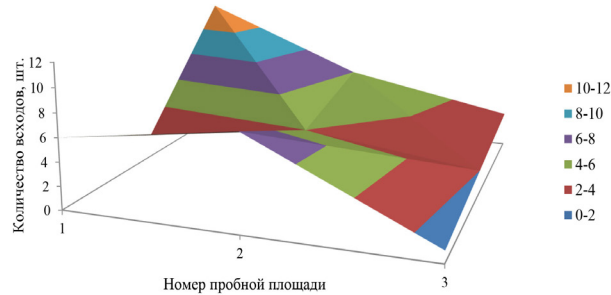


Рис. 5. Распределение количества поросли лоха узколистного и аморфы кустарниковой на опытных площадях

Fig. 5. Distribution of the number of plants of Oleaster and River Locust on the trial areas

Таблица 3

**Характер возобновления деревьев и кустарников на ПП 3**  
**Characteristics of trees and shrubs resumption on the trial area No. 3**

Вид	Ярус	Высота, м	Обилие	Происхождение	Характер распределения
Лох узколистный	Средний	1,1	Редко	Вегетативное	Единичное
		0,8	Обильно		Групповое
Аморфа кустарниковая		0,6	Редко		Единичное

Из табл. 3 следует, что характер распределения растений при учете возобновления неодинаков. Для лоха узколистного он описывается как единичный при средней высоте в группе 1,1 м, так и как групповой с высотой 0,8 м. Для аморфы кустарниковой отмечается единичное распределение со средней высотой в группе 0,6 м, что объясняется небольшим процентом наличия растения в лесной защитной полосе при ее создании.

*Выводы*

1. При исследовании защитных лесных полос Вербяной косы Азовского побережья установлено, что главной древесной породой является лох узколистный. Выделены 3 участка: с относительно высокой (78 %), средней (65 %) и низкой (27 %) сохранностью насаждений. Сохранность лесополосы характеризуется обратной зависимостью от антропогенной нагрузки.

2. Наибольшее количество деревьев – 155 шт. для 2-й группы высоты (2,95–3,89 м) – отмечено в варианте с относительно высокой степенью сохранности при среднем диаметре 10,25–15,49 см и IV классе бонитета. В варианте со средней степенью сохранности высота насаждения составила 5,0 м, с низкой – 4,0 м.



3. При учете возобновления насаждений установлено, что на пробной площади 2 степень вегетативного возобновления для *Elaeagnus angustifolia* L. более высокая, чем на пробных площадях 1 и 3. С увеличением количества вырубленных деревьев (пробная площадь 3) возобновление главной древесной породы резко снижается, а аморфы кустарниковой – возрастает.

4. Лесному хозяйству региона с целью восстановления и сохранения защитных лесных насаждений побережья рекомендуется ограничение рекреационной нагрузки на них, своевременное проведение в насаждениях агротехнических уходов и – в зависимости от степени сохранности лесополос и обилия возобновления – их полная или частичная реконструкция.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бровко Ю.В. Сравнительный анализ флор Вербяной косы и косы Чушка Восточного Приазовья // Географические исследования Краснодарского края: сб. науч. тр. / отв. ред. А.В. Погорелов. Вып. 6. Краснодар: КубГУ, 2011. С. 190–193.

Brovko Yu.V. Comparative Analysis of Flora on the Verbyana Spit and the Chushka Spit at the Eastern Part of the Cis-Azov Region. *Geographical Studies of Krasnodar Krai: Collection of Academic Papers*. Ed. by A.V. Pogorelov. Krasnodar, KubSU Publ., 2011, iss. 6, pp. 190–193. (In Russ.).

2. Востриков А.В. Природные и техногенные факторы современного развития берегов восточной части Азовского моря: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Краснодар, 2006. 23 с.

Vostrikov A.V. *Natural and Technogenic Factors of Recent Development of the Coastlines at the Eastern Part of the Azov Sea*: Cand. Geogr. Sci. Diss. Abs. Krasnodar, 2006. 23 p. (In Russ.).

3. Ермолов А.А., Игнатов Е.И., Кизяков А.И., Илюшин Д.Г. Проблемы защиты антропогенных берегов Черного и Азовского морей // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: материалы 15-й Общерос. науч.-практ. конф. изыскател. организаций. М.: Геомаркетинг, 2019. С. 500–504.

Ermolov A.A., Ignatov E.I., Kizyakov A.I., Ilyushin D.G. Protection Problems of Anthropogenic Shores of the Black and Azov Seas. *Prospects of Evolution of Engineering Site Investigations for Construction in the Russian Federation: Proceedings of the 15th All-Russian Research and Practice Conference of Survey Organizations*. Moscow, Geomarketing Publ., 2019, pp. 500–504. (In Russ.).

4. Крыленко В.В., Крыленко М.В. Региональные особенности подходов к управлению Черноморскими прибрежными геоэко системами // Междунар. журн. гуманитар. и естеств. наук. 2017. № 9. С. 41–44.

Krylenko V.V., Krylenko M.V. Regional Specific Features of the Black Sea Coastal Geoecosystem Management. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2017, no. 9, pp. 41–44. (In Russ.).

5. Крыленко М.В., Алейникова А.М., Косьян Р.Д., Виет Лиен Н.Т., Ханг Н.М. Современные методы защиты берегов морского края дельты р. Хонгха от волновой эрозии // Вестн. РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2016. № 2. С. 58–66.

Krylenko M.V., Aleynikova A.M., Kosyan R.D., Viet Lien N.T., Hung N.M. Modern Protection Methods of the Delta R. Hong Ha Sea Coasts from Wave Erosion. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2016, no. 2, pp. 58–66. (In Russ.).

6. Литвинская С.А. О необходимости сохранения уникальных ландшафтов прибрежной экотонной Азово-Черноморской зоны // Ботан. вестн. Сев. Кавказа. 2019. № 1. С. 14–30.

Litvinskaya S.A. About Need for the Preservation of Unique Landscapes of the Coastal Ecotonic Azov-Black Sea Zone. *Botanical Herald of the North Caucasus*, 2019, no. 1, pp. 14–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.33580/2409-2444-2019-5-1-14-30>

7. Литвинская С.А., Постарнак Ю.А. Сохранение биологического разнообразия – основа устойчивого развития прибрежных экосистем Азовского моря: моногр. Краснодар, 2007. 240 с.

Litvinskaya S.A., Postarnak Yu.A. *Conservation of Biological Diversity – the Basis for Sustainable Development of Coastal Ecosystems of the Azov Sea*: Monograph. Krasnodar, 2007. 240 p. (In Russ.).

8. Максименко А.П. Облесение песчано-ракушечных почв Восточного Приазовья: моногр. Краснодар: Кубан. учеб., 2002. 287 с.

Maksimenko A.P. *Afforestation of Sandy-Shelly Soils of the Eastern Cis-Azov Region*: Monograph. Krasnodar, Kubanskiy uchebnik Publ., 2002. 287 p. (In Russ.).

9. Нагалецкий Ю.Я., Чистяков В.И. Физическая география Краснодарского края. Краснодар: Сев. Кавказ, 2001. 256 с.

Nagalevskiy Yu.Ya., Chistyakov V.I. *Physical Geography of Krasnodar Krai*. Krasnodar, Severnyy Kavkaz Publ., 2001. 256 p. (In Russ.).

10. Пешков В.М. Современное состояние и перспективы защиты берегов Черного и Азовского морей Краснодарского края // Экол. безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2015. № 1. С. 12–19.

Peshkov V.M. Modern State and Perspectives of Protection of the Black and Azov Seas Coasts in the Krasnodar Region. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, 2015, no. 1, pp. 12–19. (In Russ.).

11. Полевая геоботаника / под общ. ред. Е.М. Лавренко и А.А. Корчагина. М.; Л.: Наука, 1964. Т. 3. 532 с.

*Field Geobotany*. Ed. by E.M. Lavrenko, A.A. Korchagin. Moscow, Nauka Publ., 1964, vol. 3. 532 p. (In Russ.).

12. Рябкова О.И., Герб М.А. Современное состояние морских берегов Калининградской области и биологические меры защиты от их разрушения // Арктические берега: путь к устойчивости: материалы XXVII Междунар. береговой конф., 24–29 сент. 2018 г. Мурманск: МАГУ, 2018. С. 265–268.

Ryabkova O.I., Gerb M.A. The Current State of the Sea Coasts of the Kaliningrad Region and Biological Protection for Their Destruction. *Arctic Shores: Shore-Up to Sustainability: Proceedings of the 27th International Coastal Conference*. Murmansk, MASU Publ., 2018, pp. 265–268. (In Russ.). [https://doi.org/10.31519/conferencearticle\\_5cebbc-187fcff4.86616306](https://doi.org/10.31519/conferencearticle_5cebbc-187fcff4.86616306)

13. Савченко В.С., Бочко Т.Ф. Особенности формирования Эдафона экосистем Вербяной косы // Современные территориальные исследования: сб. ст. Краснодар: Просвещение-Юг, 2018. С. 53–55.

Savchenko V.S., Bochko T.F. Formation Features of Edaphone Ecosystems of Verbyana Spit. *Modern Territorial Studies: Collection of Articles*. Krasnodar, Prosveshcheniye-Yug Publ., 2018, pp. 53–55. (In Russ.).

14. Мойсієнко І.І. Флора Північного Причорномор'я (структурний аналіз, синантропізація, охорона): автореф. дис. ... д-ра біол. наук. Київ, 2011. 35 с.

Moysienko I.I. *Flora of the Northern Black Sea Area (Structural Analysis, Synanthropization, Protection)*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Kiev, 2011. 35 p. (In Ukrainian).

15. Bautista F., Palacio-Aponte G., Quintana P., Zinck J.A. Spatial Distribution and Development of Soils in Tropical Karst Areas From the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology*, 2011, vol. 135, iss. 3-4, pp. 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.014>

16. Ivlieva O.V., Bepalova L.A., Bepalova E.V., Kazachkova E.M. Geoecological Monitoring of the Sea of Azov Coastline (Rostov Region). *Water Resources, Forest, Marine and Ocean Ecosystems. Soils – Forest Ecosystems: Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2017)*. Sofia, STEF92 Technology, 2017, pp. 217–224. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/11/S01.027>

17. Pshenichnikov B.F., Pshenichnikova N.F. The Impact of Vegetation on Humus Formation and Morphology of Brown Forest Soils in Coastal Areas of the Southeastern Part of Russian Far East. *Eurasian Soil Science*, 2015, vol. 48, iss. 4, pp. 337–346. <https://doi.org/10.1134/S1064229315040080>

18. Selivanov A.O. Morphological Changes on Russian Coasts Under Rapid Sea-Level Changes: Examples from the Holocene History and Implications for the Future. *Journal of Coastal Research*, 1996, vol. 12, no. 4, pp. 823–830.

19. Timoshkin O.A. Coastal Zone of the World's Great Lakes as a Target Field for Interdisciplinary Research and Ecosystem Monitoring: Lake Baikal (East Siberia). *Limnology and Freshwater Biology*, 2018, no. 1, pp. 81–97. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-a-1-81>

20. Wang X.-F., Yuan X.-Z., Liu H., Zhang L., Yu J.-J., Yue J.-S. Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR. *Huanjing Kexue = Environmental Science*, 2015, vol. 36, no. 10, pp. 3662–3673.

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья  
УДК 630\*232.411  
DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-88-99

### Влияние высокоактивных соединений на механические свойства древесины двухлетних сеянцев сосны обыкновенной в лесных питомниках

*М.В. Ермакова, д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAE-9520-2020](https://orcid.org/0000-0002-9894-6587),*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9894-6587>*

*С.К. Стеценко<sup>✉</sup>, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-2834-2020](https://orcid.org/0000-0002-4885-3817),*

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

*Е.М. Андреева, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-3340-2020](https://orcid.org/0000-0003-2651-2541),*

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

Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144;  
m58\_07e@mail.ru, stets\_s@mail.ru<sup>✉</sup>, e\_m\_andreeva@mail.ru

Поступила в редакцию 17.03.21 / Одобрена после рецензирования 21.06.21 / Принята к печати 24.06.21

**Аннотация.** В Уральском регионе сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) выполняет ведущую средообразующую функцию и является экономически ценной древесной породой. Многолетнее применение комплекса пестицидов в лесных питомниках, где выращивают сосну, привело к пестицидному загрязнению пахотной почвы. Такое состояние почв вызывает нарушение роста и развития сеянцев, ослабляет их способность к преодолению трудного периода пересадки в лесную среду. Биостимуляторы, созданные из продуктов переработки хвои пихты и ели, а также органический мелиорант (лесная подстилка из сосново-березового насаждения) изучались как возможные способы снижать отрицательное воздействие пестицидов на сеянцы сосны. В то же время биологически активные препараты и субстраты могут становиться причиной сдвига метаболических процессов молодых растений, что отражается на формировании физических характеристик стволиков. Цель исследования – оценить, как под воздействием высокоактивных веществ разной природы изменяется плотность древесины у 2-летних сеянцев сосны обыкновенной, выращиваемых в лесных питомниках Среднего Урала. Объектами исследования стали 2-летние сеянцы сосны, выкопанные осенью на производственных полях и экспериментальных площадках в разных лесных питомниках. В лабораторных условиях устанавливали морфометрические показатели сеянцев. Базисную плотность древесины стволиков в 1-й и 2-й годы роста определяли по методу максимальной влажности. Выявлено, что метаболическая активность пестицидов и биостимуляторов приводит к изменениям в формировании физических свойств стволиков на начальных этапах роста сосны: при выращивании сеянцев на загрязненной пестицидами почве высота сеянцев ниже, а базисная плотность древесины стволика выше по сравнению с контролем. Лесная подстилка из смешанного насаждения при внесении ее в почву лесного питомника позволяет получать сеянцы большей высоты и не оказывает существенного влияния на процесс формирования физико-механических свойств древесины. Применение биостимуляторов ведет к быстрому росту стволиков, но при этом плотность древесины уменьшается относительно контрольного варианта. В дальнейшем необходимы корректирующие мероприятия и разработка сбалансированной

© Ермакова М.В., Стеценко С.К., Андреева Е.М., 2023



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

агротехники для получения сосны с требуемыми физическими качествами древесины. Изучение особенностей формирования качественных характеристик посадочного материала в случае использования интенсивных технологий в питомниках поможет разработать целевые модели последующего применения получаемых сеянцев при лесопользовании.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, сеянцы, сеянцы сосны обыкновенной, лесной питомник, пестициды, пестицидное загрязнение почвы, плотность древесины, лесная подстилка, биостимуляторы, Средний Урал

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН».

**Для цитирования:** Ермакова М.В., Стеценко С.К., Андреева Е.М. Влияние высокоактивных соединений на механические свойства древесины двухлетних сеянцев сосны обыкновенной в лесных питомниках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 88–99. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-88-99>

Original article

## Influence of Highly Active Compounds on Mechanical Properties of Wood of Two-Year-Old Scots Pine Seedlings in Forest Nurseries

*Mariya V. Ermakova, Doctor of Agriculture, Leading Research Scientist;*

ResearcherID: [AAE-9520-2020](https://orcid.org/0000-0002-9894-6587), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9894-6587>

*Svetlana K. Stetsenko*<sup>✉</sup>, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAD-2834-2020](https://orcid.org/0000-0002-4885-3817), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4885-3817>

*Elena M. Andreeva, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;*

ResearcherID: [AAD-3340-2020](https://orcid.org/0000-0003-2651-2541), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2651-2541>

Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202 a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; m58\_07e@mail.ru, stets\_s@mail.ru<sup>✉</sup>, e\_m\_andreeva@mail.ru

Received on March 17, 2021 / Approved after reviewing on June 21, 2021 / Accepted on June 24, 2021

**Abstract.** Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) has the leading environment-forming function. Also, the pine is an economically valuable tree species in the Ural region. The long-term use of the pesticide complex in forest nurseries has led to the pesticide pollution of the arable soil, which causes disruption in the pine seedlings growth, weakening their ability to overcome the difficult period of transportation into the forest environment. The use of biostimulants created from extracts of fir and spruce needles, as well as organic ameliorant (forest litter from pine-birch plantations), is considered as a way to reduce the negative impact of pesticides on pine seedlings. At the same time, biologically active preparations and substrates can lead to shifts in the metabolic processes of young plants, which affect the formation of physical characteristics of the stems. The research aims at assessing how wood density changes under the influence of highly active substances of different nature in two-year-old Scots pine seedlings grown in forest nurseries of the Middle Urals. The study objects were two-years-old pine seedlings dug out in autumn from silvicultural fields and experimental sites in different forest nurseries. Morphometric parameters of seedlings were determined in the laboratory conditions. The basic wood density of stems in the 1st and 2nd years of growth was determined by the method of maximum humidity. It was found that the metabolic activity of pesticides and biostimulants



leads to changes in the formation of physical properties of stems at the initial stages of pine growth: when growing seedlings in pesticide-polluted soil, the height of seedlings is lower, and the basic density of stem wood is higher, compared to control group. Forest litter from mixed plantations (birch-pine), when introduced to the forest nursery soil, produces seedlings of greater height and has no significant effect on the formation of physical and mechanical properties of wood. The seed treatment by biostimulants leads to a rapid increase in the stems size, but the wood density decreases, relative to the control option. Corrective measures and the development of balanced agronomic machinery for production of pine with the required physical qualities of wood are needed in the future. The study of the qualitative characteristics formation features of trees, when using intensive technologies in nurseries, is necessary for the development of target models for the subsequent use of such seedlings in forest management.

**Keywords:** Scots pine, seedlings, Scots pine seedlings, forest nursery, pesticides, pesticide pollution of soil, wood density, forest litter, biostimulants, Middle Urals

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

**For citation:** Ermakova M.V., Stetsenko S.K., Andreeva E.M. Influence of Highly Active Compounds on Mechanical Properties of Wood of Two-Year-Old Scots Pine Seedlings in Forest Nurseries. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 88–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-88-99>

### Введение

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) составляет важнейшую часть лесных ресурсов Уральского региона: она как выполняет ведущие средообразующие функции в лесных экосистемах, так и является экономически ценной древесной породой в лесохозяйственном производстве. Восстановление ресурсов этой породы во многом обеспечивается созданием лесных культур из посадочного материала, получаемого в местных лесных питомниках. В недавнем прошлом они представляли собой большие агротехнические хозяйства, занимающие значительные площади и дающие возможность соблюдения севооборотов и смены выращиваемых пород. Экономическая ситуация сегодняшнего дня привела к тому, что сейчас лесные питомники региона занимают относительно небольшие территории, функционируют уже более 30 лет и чаще всего производят монокультуру – сосну или ель. Многолетнее применение химических средств борьбы с сорной растительностью и фитопатологическими заболеваниями стало причиной того, что в пахотной почве присутствует пестицидное загрязнение, вызывающее нарушение роста и развития семян и ослабляющее их способность к преодолению трудного периода пересадки в условия леса [16].

Особенностью современной агротехники в лесных питомниках является растущий интерес к использованию ресурсосберегающих, малозатратных и при этом по возможности эффективных способов получения качественного посадочного материала для лесовосстановления. Вместе с традиционными минеральными удобрениями могут применяться мелиоранты, ускоряющие процессы оздоровления почвы [1, 3, 27]. Для смягчения негативных, связанных с нарушением роста семян [17], последствий использования пестицидов активно внедряют стимулирующие ростовые препараты, полученные по инновационным технологиям из отходов переработки природного сырья [2, 9, 19]. В целом большинство современных средств ухода за сеянцами – это высокоак-



тивные соединения, механизм действия которых может существенно влиять на метаболизм хвойных растений. Между тем следует понимать, что данные виды являются долгорастущими многолетними растениями, в перспективе – источником хозяйственно-ценного сырья для лесной промышленности. Следовательно, применяя активные препараты при выращивании посадочного материала, необходимо знать, как они могут повлиять на формирование древесины сеянцев.

Одной из основных характеристик качества получаемого хвойного растения можно считать плотность древесины, которая формируется под воздействием условий роста и оказывает значительное влияние на физические и механические свойства древесины. Обычно плотность оценивают для древесины уже сформированных деревьев в устойчиво функционирующих лесных культурах или древостоях. У 2-летних сеянцев плотность древесины, скорее всего, будет величиной, которая может значительно измениться с возрастом и при пересадке на лесокультурный участок. Однако изучение этого показателя, особенно у молодых деревьев, выращиваемых с применением веществ и препаратов-активаторов роста, необходимо, поскольку особенности развития сеянцев на начальных этапах роста могут сказаться на состоянии деревьев в дальнейшем, по достижении ими более старшего возраста. Пролонгированное влияние на развитие сосны пестицидов, использованных при уходах посевов в лесных питомниках [16], влияние удобрений и лесомелиоративных мероприятий на физические свойства древесины были показаны ранее. При этом данные свойства исследуются в культурах и древостоях начиная только со 2-го класса возраста [7, 14, 21, 24, 25]. Сведений о влиянии высокоактивных препаратов, применяемых при выращивании посадочного материала хвойных пород растений, на физические свойства формирующейся древесины пока немного [4, 5].

Мы полагаем, что необходимо обращать внимание на особенности формирования качественных характеристик посадочного материала при использовании интенсивных технологий в питомниках. Это важно для разработки целевых моделей последующего применения получаемых сеянцев при лесопользовании. Пока такой подход ранней диагностики предлагается для подроста хвойных древесных пород [15], что позволит получать деревья с прогнозируемыми техническими свойствами и, следовательно, внесет ясность в последующее использование выращиваемых лесных культур. Цель настоящего исследования – оценить, как под воздействием высокоактивных веществ разной природы изменяется плотность древесины у 2-летних сеянцев сосны обыкновенной, выращиваемых в лесных питомниках Свердловской области.

#### *Объекты и методы исследования*

Проведен анализ данных о плотности древесины, установленных в ходе ряда отдельных экспериментов. Основной задачей при этом было оценить состояние сеянцев сосны в ответ на применение комплекса пестицидов, а также органического мелиоранта – лесной подстилки – и стимуляторов роста, полученных по инновационной технологии из природного сырья.

Воздействие пестицидов на сеянцы сосны изучали в производственных посевах в 4 крупных питомниках Свердловской области в окрестностях г. Екатеринбурга. Все они входят в лесную зону Свердловской области, в состав Средне-Уральского таежного района. По лесохозяйственной классификации

Р.П. Исаевой [6], питомники располагаются на территории Тагильско-Свердловского зауральского предгорного района. Почвы дерново-подзолистые, среднесуглинистые. Согласно ведомственным данным, содержание гумуса в питомниках – от 4,6 до 5,6 %;  $pH_{\text{сол}}$  – от 4,0 до 5,2; подвижных форм фосфора и калия – от 4,4 до 13,0 и от 1,0 до 9,0 соответственно. По количеству органического вещества почва питомников относится к сильноокультуренным для возделывания лесных пород, по остальным показателям – к средне- и слабоокультуренным [8]. Эти варианты являются производственными посевами. Согласно техническим планам выращивания посадочного материала, на площади питомников в основном предусмотрено применение гербицидов при обработке почвы в паровых полях. Для послевсходовых уходов рекомендуются раундап, голал, зеллек-супер и др. [11]. Высокая активность препаратов связана с тем, что в относительно небольших количествах и, обладая системным действием, они способны подавлять развитие высокоустойчивых видов сорной растительности. Отбор семян проводили в каждом питомнике по диагональной трансекте, объем образца – 850–1000 семян, из которых методом случайной выборки для проведения исследований составлялся образец из 100 шт. Поскольку при выращивании посадочного материала в Асбестовском питомнике пестициды практически не применялись, этот вариант приняли как контрольный.

Добавление органического мелиоранта в почву и предпосевную обработку семян биостимуляторами осуществляли в ходе экспериментальной работы по исследованию способов очищения почвы от пестицидного загрязнения и снижения отрицательных последствий его влияния на семена. Эти варианты – экспериментальные посева. В качестве органического мелиоранта использовали лесную подстилку из смешанного древостоя (5С5Б), которую вносили в свежем виде в пахотную почву, где присутствовало пестицидное загрязнение. Лесная подстилка содержит естественные микробоценозы с отлаженными трофическими цепочками и высокой биологической активностью, за счет чего ускоряет разложение пестицидов, а также может являться способом обогащения почвы полезными микроорганизмами, улучшающими развитие древесных растений посредством активации процессов микоризообразования [22, 26]. Дозы внесения лесной подстилки были 5 и 20 кг/м<sup>2</sup>. Субстрат вкапывали однократно весной, незадолго до посева семян сосны, на глубину 10–15 см в площадки размером 1 м<sup>2</sup>. В почву контрольного варианта мелиорант не вносили.

Стимуляторы роста, которыми были обработаны семена сосны перед посевом, являются продуктами экстракции зелени хвойных деревьев (пихты, ели), остающейся после заготовки древесины. Эти препараты разработаны в ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, их запатентованные названия – Вэрва и Вэрва-ель [19, 20]. Ранее была показана эффективность применения этих стимуляторов как на агрокультурных растениях [13], так и на хвойных сеянцах: включение препаратов в схему выращивания сосны или ели позволяет получать стандартные по высоте сеянцы при минимальных сроках их возделывания в лесных агроценозах [18]. Непосредственно при проведении данного эксперимента семена сосны замачивали на 6 ч в растворах Вэрва и Вэрва-ель, в дозах 0,1 и 0,25 мл на 1 кг семян. Семена в контрольном варианте замачивали на то же время в дистиллированной воде. Размер опытных площадок – 1,5×1 м. Во всех экспериментальных вариантах сеянцы сосны выращивали в течение 2 лет с соблюдением

всех агротехнических приемов, предусмотренных для посадочного материала (полив, рыхление и др.).

Согласно информации сайта <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php>, погодные условия роста для каждого набора вариантов различались (табл. 1). Среднее многолетнее значение температуры – 14,6 °С, норма осадков за вегетационный сезон – 347 мм.

Таблица 1

**Погодные условия вегетационных сезонов (май–сентябрь)  
в период роста сеянцев**  
**Weather conditions of the growing seasons (from May to September) in the period  
of seedling growth**

Вид исследуемого вещества / препарата	Годы исследования	Средняя температура воздуха, °С		Количество осадков, мм	
		1-й год	2-й год	1-й год	2-й год
Комплекс пестицидов	2007–2008	14,9	14,7	412	365
Лесная подстилка	2003–2004	15,6	15,9	375	320
Биостимуляторы	2016–2017	17,1	14,2	175	349

Выкопку сеянцев производили осенью, по окончании 2-го вегетационного сезона. В лабораторных условиях у каждого сеянца измеряли биометрические параметры – диаметр стволика на уровне корневой шейки, высоту стволика, длину прироста побегов за 1-й и 2-й годы вегетации (приросты 1 и 2) – и определяли базисную плотность древесины по методу максимальной влажности [10, 12]. Взвешивание осуществляли на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Объем выборки для измерения биометрических показателей и базисной плотности древесины составил не менее 100 сеянцев. Для апостериорного сравнения показателей использовали t-критерий Стьюдента и LSD-test (критерий наименьшей значимости). Статистическую обработку данных выполняли с применением MSO Excel 2007 и пакета программ Statistica 8.0.

*Результаты исследования и их обсуждение*

Анализ полученных результатов показал, что сеянцы сосны, выращенные с применением активных препаратов и субстрата, имели в основном стандартные биометрические показатели (табл. 2). Тем не менее использование комплекса пестицидов в производственных посевах снижает размеры сеянцев относительно контрольного варианта: высоту – до 28 % и диаметр стволика – до 40 %. Применение органического мелиоранта и биостимуляторов, наоборот, обеспечило прирост растений по высоте (до 46 % в опыте с изучением биостимуляторов), но незначительно отразилось на утолщении стволиков.

Темпы роста стволика во 2-й год вегетации у сеянцев в посевах с использованием комплекса пестицидов были существенно ( $t_{\text{факт}} = 7,25-12,35 > t_{\text{табл}} = 1,96$  при  $p \leq 0,05$ ) выше, чем в 1-й. В опыте, где была внесена лесная подстилка, прирост стволиков по высоте во 2-й год оказался достоверно ( $t_{\text{факт}} = 2,82-4,31 > t_{\text{табл}} = 1,96$  при  $p \leq 0,05$ ) ниже, чем в 1-й. Сеянцы под воздействием биостимуляторов в 1-й год росли значительно активнее по сравнению со 2-м.

Таблица 2

**Биометрические показатели и плотность древесины сеянцев сосны  
в лесных питомниках**  
**Biometrics and wood density of pine seedlings in forest nurseries**

Вариант	Диаметр корневой шейки, мм	Высота дерева, см	1-й год		2-й год	
			прирост, см	плотность древесины ( $\rho_1$ ), кг/м <sup>3</sup>	прирост, см	плотность древесины ( $\rho_2$ ), кг/м <sup>3</sup>
<i>Сеянцы, выращенные с применением комплекса пестицидов</i>						
Питомник № 1 (район г. Ревда)	2,6±0,07	10,6±0,21	4,4±0,17	433±1,3	6,2±0,19	329±1,5
Питомник № 2 (район г. Первоу- ральск)	2,3±0,07	11,1±0,20	4,7±0,17	426±3,3	6,4±0,14	339±1,2
Питомник № 3 (район г. Егоршино)	2,8±0,06	12,5±0,23	5,5±0,13	423±2,4	7,0±0,14	338±1,2
Питомник № 4 (район г. Асбест) (контроль, без пестицидного загрязнения)	3,8±0,09	14,8±0,30	5,8±0,14	400±1,2	9,0±0,21	320±1,3
<i>Сеянцы, выращенные с применением органического мелиоранта</i>						
Добавление лесной подстилки, 5 кг/м <sup>2</sup>	2,3±0,05	12,1±0,19	6,5±0,13	425±5,4	5,7±0,13	318±2,6
Добавление лесной подстилки, 20 кг/м <sup>2</sup>	2,5±0,05	13,5±0,32	7,0±0,13	438±1,0	6,6±0,16	324±1,3
Без добавления лесной подстилки (контроль)	2,6±0,06	11,9±0,23	6,0±0,13	420±6,9	5,9±0,21	312±3,4
<i>Сеянцы, выращенные с применением стимуляторов роста</i>						
Посев с обработкой семян препаратом Вэрва, 0,1 мг/кг	2,3±0,09	12,5±0,44	7,3±0,20	443±5,1	5,2±0,34	330±2,2
Посев с обработкой семян препаратом Вэрва, 0,25 мг/кг	2,3±0,08	12,9±0,51	7,0±0,21	420±3,8	5,9±0,36	316±1,6
Обработка семян препаратом Вэрва-ель, 0,1 мг/кг	2,0±0,06	13,2±0,46	7,8±0,21	437±3,0	5,3±0,30	319±2,7
Обработка семян препаратом Вэрва-ель, 0,25 мг/кг	2,1±0,07	11,6±0,42	7,3±0,18	422±2,3	4,4±0,30	316±2,1
Без обработки семян (контроль)	1,8±0,06	9,0±0,30	5,4±0,13	432±4,9	3,6±0,22	337±1,4

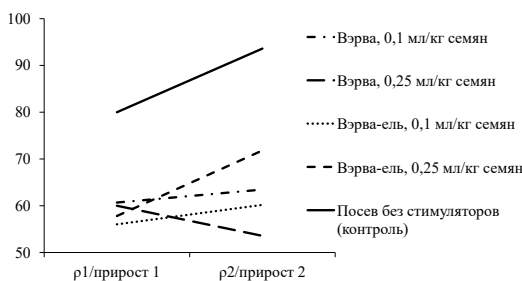
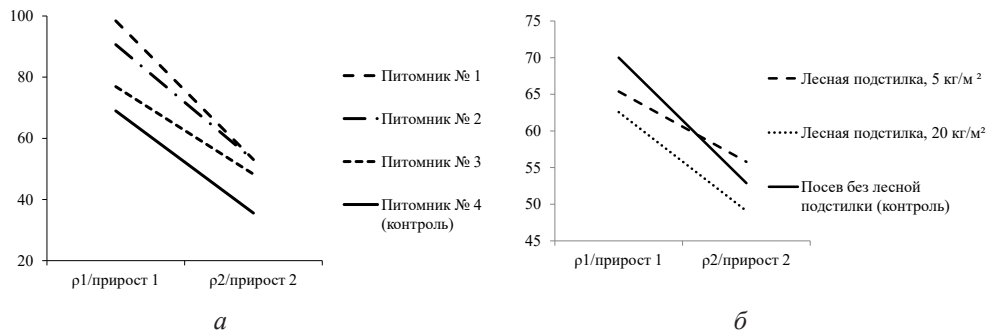
В контрольных вариантах по всем разделам эксперимента тенденция соотношения приростов по высоте 1-го и 2-го годов была примерно такой же, как в опытных вариантах, поэтому можно предположить, что на скорость приростов больше влияют погодные условия, чем примененное активное вещество. Особенно резко различались между собой погодные условия эксперимента, где рассматривалось воздействие

стимуляторов на сосну: 1-й год роста был сухим и жарким, 2-й – прохладным и влажным. Биостимуляторы в данном случае помогли сеянцам преодолеть неблагоприятные условия начального этапа роста и достичь стандартных размеров.

При анализе базисной плотности древесины в экспериментах с изучением воздействия комплекса пестицидов и внесения лесной подстилки выявлена некоторая закономерность. В опытных вариантах, как показал LSD-test, базисная плотность древесины сеянцев была значительно (при  $p \leq 0,05$ ) выше, чем в контрольных вариантах, как в 1-й, так и во 2-й годы.

В случае использования биостимуляторов, наоборот, стволы контрольного варианта отличались существенно (при  $p \leq 0,05$ ) более высокой плотностью древесины как в 1-й, так и на 2-й год при применении Вэрва и Вэрва-ель в дозе 0,25 мг/кг. Использование стимулятора Вэрва в дозе 0,1 мг/кг, напротив, привело к существенному (при  $p \leq 0,05$ ) увеличению плотности древесины в 1-й год по сравнению с контролем. Внесение Вэрва-ель в дозе 0,1 мг/кг не оказало заметного влияния на плотность древесины в 1-й год. На 2-й год во всех вариантах произошло существенное снижение плотности древесины по сравнению с контролем, за исключением варианта с использованием Вэрва в дозе 0,1 мг/кг – в этом случае не отмечено значимых (при  $p \leq 0,05$ ) различий в плотности древесины относительно контроля. В целом базисная плотность древесины во всех экспериментальных посевах соответствовала параметрам, установленным для производственных питомников.

Развитие биометрических параметров и формирование при этом механических свойств древесины 2-летних сеянцев сосны было рассмотрено с использованием соотношения средних базисной плотности древесины и прироста стволика по годам – т. е. с использованием распределения плотности древесины на единицу длины. Графические результаты вычислений приведены на рисунке.



Соотношение плотности древесины и прироста сеянцев сосны по годам вегетации в вариантах опытов с применением: *а* – комплекса пестицидов; *б* – органического мелиоранта; *в* – стимуляторов роста

The ratio of wood density and growth of pine seedlings by years of vegetation in different experimental options, seedlings grown with: *а* – the use of pesticides; *б* – an organic ameliorant; *в* – growth stimulants

Соотношение плотности древесины и размеров стволика в 1-й год вегетации выше в случае использования комплекса пестицидов при выращивании сеянцев, чем в случае их роста под воздействием органического мелиоранта и биостимуляторов. Во 2-й год роста сосны отмечается снижение соотношения изучаемых показателей за счет значительного уменьшения плотности древесины и увеличения высоты побегов. Данное соотношение у сеянцев в контрольном варианте было меньше на протяжении всего срока выращивания посадочного материала, чем у сеянцев в питомниках, где присутствовало пестицидное загрязнение, что свидетельствует о выраженном многофакторном влиянии пестицидов на метаболизм сеянцев сосны.

Оптимизация продуктивных свойств пахотной почвы при помощи внесения лесной подстилки не оказывает влияния на соотношение свойств древесины и биометрических параметров, что может быть связано с улучшением условий роста сосны лесной подстилкой прежде всего в 1-й год выращивания. Это отражается на увеличении размеров сеянцев, при этом нет существенного влияния на метаболизм растений: величина и изменение относительных показателей не различались у сеянцев контрольного и опытных вариантов.

Увеличение приростов и снижение плотности древесины у сеянцев, выращенных с предпосевной обработкой семян биостимуляторами Вэрва и Вэрва-ель, выразились в значительном отклонении относительного показателя у сеянцев опытных вариантов от его значения в контрольном варианте, где оно было выше как в 1-й, так и во 2-й годы роста. Такое различие можно объяснить активным воздействием биостимуляторов на метаболические процессы, связанные с механизмами активизации ростовых процессов растений [23]. При сохранении данной особенности формирования древесины сеянцев, выращиваемых с использованием стимуляторов, возможна корректировка агротехнических приемов и разработка сбалансированного процесса возделывания с получением сосны с требуемыми физическими качествами древесины.

#### *Выводы*

1. Биологически активные соединения, применяемые при выращивании сосны обыкновенной, могут оказывать влияние на формирование плотности древесины получаемых сеянцев.

2. Метаболическая активность пестицидов и биостимуляторов по отношению к сеянцам сосны приводит к изменениям в формировании физических свойств ее древесины на начальных этапах роста: при выращивании сеянцев на загрязненной пестицидами почве высота сеянцев падает, а базисная плотность древесины стволика увеличивается.

3. Применение ростостимулирующих препаратов Вэрва и Вэрва-ель обуславливает быстрое увеличение размеров стволиков, но при этом плотность древесины уменьшается относительно контрольного варианта. В последующем необходимы корректирующие мероприятия и разработка сбалансированной агротехники для получения сосны с требуемыми физическими качествами древесины.

4. Лесная подстилка из смешанного насаждения при внесении ее в почву лесного питомника позволяет увеличивать высоту сеянцев и не оказывает существенного влияния на процесс формирования физико-механических свойств древесины.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Антонов Г.И., Сорокин Н.Д., Барченков А.П., Кондакова О.Э. Оптимизация лесовыращивания с использованием биоконверсии древесно-опилочной массы в условиях Красноярской лесостепи // Лесоведение. 2018. № 1. С. 56–64.

Antonov G.I., Sorokin N.D., Barchenkov A.P., Kondakova O.E. Optimisation of Silviculture Using Bioconversion of Sawdust Pulp in Krasnoyarsk Forest-Steppe. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2018, no. 1, pp. 56–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0024114818010059>

2. Егорова А.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В. Влияние хвойного препарата на рост и элементный состав сеянцев *Pinus sylvestris* L. в условиях лесного питомника // Химия растит. сырья. 2017. № 2. С. 171–180.

Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. Effects of Application of a Conifer-Derived Chemical on the Growth and Elemental Composition of *Pinus sylvestris* L. Seedlings in a Forest Nursery. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of Plant Raw Material, 2017, no. 2, pp. 171–180. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017021720>

3. Егорова Е.В. Эколого-биологическая оценка мелиорантов для детоксикации почв, загрязненных тяжелыми металлами // Проблемы агрохимии и экологии. 2010. № 1. С. 55–62.

Yegorova E.V. Ecological and Biological Assessment of Improvers for Soil's Detoxication From Heavy Metals. *Problemy agrohimii i ekologii*, 2010, no. 1, pp. 55–62. (In Russ.).

4. Ермакова М.В. Комплексная оценка качества сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесных питомниках Уральского региона // Аграр. вестн. Урала. 2009. № 1(55). С. 70–73.

Yermakova M.V. Complex Estimation of Quality of Scotch Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seedlings in Forest Tree Nurseries of the Ural Region. *Agrarnyi vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals, 2009, no. 1(55), pp. 70–73. (In Russ.).

5. Ермакова М.В. Структура посадочного материала и качество древесины сосны при использовании органических мелиорантов // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 4(32). С. 78–88.

Ermakova M.V. Structure of Planting Material and Quality of Pine Wood Using Organic Meliorants. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2018, vol. 8, no. 4(32), pp. 78–88. (In Russ.). [https://doi.org/10.12737/article\\_5c1a3209cfc6e0.58332024](https://doi.org/10.12737/article_5c1a3209cfc6e0.58332024)

6. Исаева Р.П. Рекомендации по ведению лесного хозяйства на зонально-типологической основе в лесах Свердловской области. М., 1984. 56 с.

Isaeva R.P. *Recommendations for Forest Management on a Zonal-Typological Basis in the Forests of the Sverdlovsk Region*. Moscow, 1984. 56 p.

7. Козлов В.А., Кустерная М.В., Неронова Я.А. Влияние лесохозяйственных мероприятий на плотность и химический состав древесины сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 6. С. 7–13. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/355/355d-8c4ebe8a8a4c97f77ea273271396.pdf>

Kozlov V.A., Kisternaya M.V., Neronova Ya.A. Influence of Forestry Measures on Density and Chemical Wood Composition of Scotch Pine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2009, no. 6, pp. 7–13. (In Russ.).

8. Наставление по выращиванию посадочного материала древесных и кустарниковых пород в лесных питомниках Уральского региона. М., 1998. 172 с.

*Guidelines for the Cultivation of Tree and Shrub Planting Material in Forest Nurseries of the Ural Region*. Moscow, 1998. 172 p. (In Russ.).

9. Панькив О.Г., Полянская В.В., Паршикова В.Н., Степень Р.А. Использование продуктов переработки древесной зелени пихты в сельском хозяйстве // Вестн. КрасГАУ. 2009. № 3. С. 209–212.

Pankiv O.G., Polyanskaya V.V., Parshikova V.N., Stepen R.A. The Use of the Recycling Products of the Fir Wood Green in Agriculture. *Bulletin of KrasGAU*, 2009, no. 3, pp. 209–212. (In Russ.).

10. *Полубояринов О.И.* Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 159 с.

Poluboyarinov O.I. *Wood Density*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 159 p. (In Russ.).

11. Справочник пестицидов 2022. Режим доступа: <https://www.agroxxi.ru/goshandbook> (дата обращения: 13.12.22).

Handbook of Pesticides 2022. *Agroindustrial Web Portal "AgroXXI"*. 2022.

12. *Столяров Д.П., Полубояринов О.И., Декатов Н.Н., Книзе А.А., Минаев В.Н., Молоткова Н.Д., Некрасова Г.Н., Ананьев В.А.* Методические рекомендации. Использование ядер древесины в лесоводственных исследованиях. Л.: ЛенНИИЛХ, 1988. 43 с.

Stolyarov D.P., Poluboyarinov O.I., Dekatov N.N., Knize A.A., Minaev V.N., Molotkova N.D., Nekrasova G.N., Anan'ev V.A. *Guidelines. The Use of Wood Core Samples in the Silvicultural Research*. Leningrad, LenNIILKh Publ., 1988. 43 p. (In Russ.).

13. *Тулинов А.Г.* Применение препарата Вэрва-Ель на посадках картофеля // Защита и карантин растений. 2017. № 2. С. 41–42.

Tulinov A.G. Use of Verva-El Preparation on Potato Plantings. *Zashchita i karantin rasteniy = Plant Protection and Quarantine*, 2017, no. 2, pp. 41–42. (In Russ.).

14. *Тюкавина О.Н., Клевцов Д.Н., Дроздов И.И., Мелехов В.И.* Плотность древесины сосны обыкновенной в различных условиях произрастания // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 56–64.

Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Drozdov I.I., Melekhov V.I. Wood Density of Scots Pine in Different Growth Conditions. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 6, pp. 56–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.56>

15. *Федюков В.И., Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М.* Ранняя диагностика технического качества подростка как важный элемент интенсификации лесопользования в России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 6. С. 16–23. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/80a/LX2.pdf>

Fedyukov V.I., Saldaeva E.Yu., Tsvetkova E.M. Early Diagnosis of the Undergrowth Technical Quality as an Important Element of the Forest Management Intensification in Russia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2012, no. 6, pp. 16–23. (In Russ.).

16. *Фрейберг И.А., Ермакова М.В., Стеценко С.К.* Влияние пестицидов на морфологию и физиолого-биохимические показатели сеянцев сосны обыкновенной // Лесоведение. 2004. № 2. С. 55–60.

Freiberg I.A., Ermakova M.V., Stetsenko S.K. The Influence of Pesticides on Morphology and Physiological-Biochemical Characteristics of Scots Pine Seedlings. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2004, no. 2, pp. 55–60. (In Russ.).

17. *Фрейберг И.А., Ермакова М.В., Стеценко С.К.* Модификационная изменчивость сосны обыкновенной в условиях пестицидного загрязнения. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 74 с.

Freiberg I.A., Ermakova M.V., Stetsenko S.K. *Modification Forms of Scots Pine Under Pesticide Pollution*. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2004. 74 p. (In Russ.).

18. *Хуришкяйнен Т.В., Андреева Е.М., Стеценко С.К., Терехов Г.Г., Кучин А.В.* Влияние биопрепаратов Вэрва и Вэрва-ель на рост сеянцев сосны обыкновенной // Химия растит. сырья. 2019. № 1. С. 295–300.

Khurshkaynen T.V., Andreyeva E.M., Stetsenko S.K., Terekhov G.G., Kuchin A.V. Influence of Biopreparation Verva and Verva-Spruce on the Scots Pine Seedlings Growth. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material*, 2019, no. 1, pp. 295–300. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2019014248>

19. Хуришкайнен Т.В., Кучин А.В. Лесохимия для инноваций в сельском хозяйстве // Изв. Коми НЦ УрО РАН. 2011. Вып. 1(5). С. 17–23.
- Hurshkainen T.V., Kuchin A.V. Woodchemistry for Innovation in Agriculture. *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences*, 2011, iss. 1(5), pp. 17–23. (In Russ.).
20. Широких И.Г., Огородникова С.Ю., Широких А.А., Карпова Е.М., Хуришкайнен Т.В. Биологическая активность терпеноидов, полученных эмульсионной экстракцией из древесной зелени ели, пихты и березы // Агрохимия. 2008. № 10. С. 10–17.
- Shirokikh I.G., Ogorodnikova S.Yu., Shirokikh A.A., Karpova E.M., Khurshkainen T.V. Biological Activity of Terpenoids Prepared by Emulsion Extraction from Wood Greens of Spruce, Fir, and Birch. *Agrohimia = Agrochemistry*, 2008, no. 10, pp. 10–17. (In Russ.).
21. Beets P.N., Gilchrist K., Jeffreys M.P. Wood Density of Radiata Pine: Effect of Nitrogen Supply. *Forest Ecology and Management*, 2001, vol. 145, iss. 3, pp. 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00405-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00405-9)
22. Brearley F.Q., Press M.C., Scholes J.D. Nutrients Obtained from Leaf Litter Can Improve the Growth of Dipterocarp Seedlings. *New Phytologist*, 2003, vol. 160, iss. 1, pp. 101–110. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00851.x>
23. Bulgari R., Cocetta G., Trivellini A., Vernieri P., Ferrante A. Biostimulants and Crop Responses: Review. *Biological Agriculture & Horticulture*, 2015, vol. 31, iss. 1, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1080/01448765.2014.964649>
24. Lim H., Oren R., Palmroth S., Tor-ngern P., Mörling T., Näsholm T., Lundmark T., Helmisaari H.-S., Leppälampi-Kujansuu J., Linder S. Inter-Annual Variability of Precipitation Constrains the Production Response of Boreal *Pinus sylvestris* Nitrogen Fertilization. *Forest Ecology and Management*, 2015, vol. 348, pp. 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.029>
25. Mörling T., Valinger E. Effects of Fertilization and Thinning on Heartwood Area, Sapwood Area, and Growth in Scots Pine. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1999, vol. 14, iss. 5, pp. 462–469. <https://doi.org/10.1080/02827589950154168>
26. Rudawska M., Leski T., Aučina A., Karliński L., Skridaila A., Ryliškis D. Forest Litter Amendment During Nursery Stage Influence Field Performance and Ectomycorrhizal Community of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seedlings Outplanted on Four Different Sites. *Forest Ecology and Management*, 2017, vol. 395, pp. 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.002>
27. Slávik M. Production of Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) Seedlings on Substrate Mixes Using Growth Stimulants. *Journal of Forest Science*, 2005, vol. 51, iss. 1, pp. 15–23. <https://doi.org/10.17221/4540-JFS>

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

Научная статья

УДК 57.047:58.072:630\*892.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-100-115

### Всхожесть семян хвойных интродуцентов в условиях Центрального Казахстана при различной стратификации и внесении в субстрат хвойного опада

Д.Ю. Сирман, преподаватель; ResearcherID: [ABI-1493-2020](https://orcid.org/0000-0002-0702-9215),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0702-9215>

Карагандинский университет им. академика Е.А. Букетова, ул. Университетская, д. 28,  
г. Караганда, Республика Казахстан; den-diatoma@mail.ru

Поступила в редакцию 03.02.21 / Одобрена после рецензирования 06.05.21 / Принята к печати 11.05.21

**Аннотация.** Данное исследование освещает вопросы возможного применения отходов лесного производства при проращивании семян хвойных растений в условиях засушливого климата Центрального Казахстана. Использование такого типа отходов является более доступным и экономически выгодным при выращивании сеянцев хвойных по сравнению с другими методами. Однако хвоя, имея сложный химический состав, при добавлении ее в почвенный субстрат оказывает многофакторное и неоднозначное действие на энергию прорастания, всхожесть и энергию покоя семян. Индивидуальный характер влияния хвойного опада на всхожесть семян особенно проявляется на примере *Picea purpurea* Mast., *P. asperata* Mast., *Pinus banksianau* Lamb., *P. densiflora* Siebold et Zuss., так как у них отмечена наибольшая всхожесть семян в 2 вариантах опыта – как с внесением хвои, так и без него – по сравнению с данным показателем в вариации с весенней стратификацией без внесения хвои. Кроме этого в статье рассматривается вопрос использования длительной естественной стратификации семян как альтернативного способа их посадки в условиях лесных питомников. Показано, что естественная стратификация значительно влияет на энергию покоя семян и энергию прорастания по сравнению с искусственной. При этом данные параметры по большей части коррелируют с родовой принадлежностью объектов. Так, представители родов *Picea* A.Dietr. и *Abies* Mill. имеют более высокие показатели прорастания при весенней стратификации, тогда как представители родов *Pinus* L. и *Pseudotsuga* Carr. – при естественной. Это может являться результатом эколого-биологической адаптации последних двух видов. В то же время, несмотря на достаточно убедительные данные по осенней стратификации, наилучшие показатели всхожести семян у большинства видов отмечены при весенней стратификации, включая вариацию с использованием хвойного опада. Однако введение использования данного метода, основываясь только на показателях всхожести семян, в условиях Центрального Казахстана является не совсем целесообразным, так как благоприятный период для прорастания семян в этой местности из года в год нестабильный. Таким образом, по результатам исследования сделаны выводы, что наиболее подходящим методом для проращивания семян хвойных видов, за некоторым исключением, является естественная стратификация. Применение хвойного опада незначительно влияет на показатели прорастания семян, при этом может значительно увеличивать период прорастания семян, а в отдельных случаях даже подавлять данный процесс.

**Ключевые слова:** *Pinaceae*, *Picea*, *Pinus*, *Abies*, *Pseudotsuga*, семена хвойных, всхожесть, энергия прорастания, энергия покоя, стратификация, хвойный опад, Центральный Казахстан

**Для цитирования:** Сирман Д.Ю. Всхожесть семян хвойных интродуцентов в условиях Центрального Казахстана при различной стратификации и внесении в субстрат хвойного опада // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 100–115. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-100-115>

Original article

## Seed Germination of Coniferous Introduced Species in the Environment of Central Kazakhstan with Various Stratification and Inclusion of Needle Litter into Substrate

**Denis Yu. Sirman**, Lecturer; ResearcherID: [ABI-1493-2020](https://orcid.org/0000-0002-0702-9215),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0702-9215>

Academician Y.A. Buketov Karaganda State University, University street, 28, Karaganda, 100024, Republic of Kazakhstan; den-diatoma@mail.ru

Received on February 3, 2021 / Approved after reviewing on May 6, 2021 / Accepted on May 11, 2021

**Abstract.** This study observes the issues of the possible usage of wastes from timber industry in the sprouting of seeds of coniferous plants in the arid climate of Central Kazakhstan. Such treatment of coniferous seeds is easily implementable and cost-effective, compared to the other methods. However, the complex chemical composition of needle litter in the soil substrate has the multifactorial and controversial effects on such indicators as germination energy, seed germination capacity and rest energy. In addition, the article discusses the use of long-term natural seed stratification as an alternative method of planting seeds in forest nurseries. The other studies have shown that natural stratification has a more significant effect on the indicators of seed rest energy and germination energy. However, it should be said that these parameters mostly correlate with the generic assignment of the objects. Thus, representatives of the genera *Picea* and *Abies* have more significant rates of germination during spring stratification. Whereas, representatives of the genera *Pinus* and *Pseudotsuga* – with natural stratification. This may be the result of their ecological and biological adaptation. The conditions of Central Kazakhstan are characterized by a sharply continental climate, which includes not only a sharp climate change, but also a rather low snow cover and low temperatures. Under these conditions, the seeds of the genera *Pinus* and *Pseudotsuga* may have higher adaptive abilities, which may become a further subject of research. At the same time, it was determined that despite the rather convincing data obtained during autumn stratification, the highest results of seed germination in most experimental species were noted during spring stratification, including variation with the use of needle litter. Again, it is not entirely advisable to introduce the use of this method based only on the indicators of seed germination in arid conditions of Central Kazakhstan, since the favorable period for seed germination in this area is unstable from year to year. Thus, based on the results of the study, it was concluded that the most suitable method for germinating seeds of conifers, with some exceptions, is natural stratification. The use of needle litter affects insignificantly the rates of seed germination, and in some cases even suppresses this process.

**Keywords:** *Pinaceae*, *Picea*, *Pinus*, *Abies*, *Pseudotsuga*, coniferous seeds, seed germination, germination energy, rest energy, stratification, needle litter, Central Kazakhstan





**For citation:** Sirman D.Yu. Seed Germination of Coniferous Introduced Species in the Environment of Central Kazakhstan with Various Stratification and Inclusion of Needle Litter into Substrate. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 100–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-100-115>

### Введение

В основу большинства современных интродукционных работ положен мичуринский метод акклиматизации растений путем селекции, многолетних испытаний и отбора наиболее перспективных видов для культивирования в местных условиях [19]. С. Stasolla, E.C. Yeung [28] показали, что при прорастании семян особое воздействие на них оказывают условия окружающей среды. Также на прорастание семян хвойных лесных культур влияют плотность полога леса [25, 30], освещение на начальных стадиях прорастания [29], содержание и выработка гормонов внутри клеток [23, 27], включая успешность образования микоритического симбиоза [22]. Важными показателями развития сеянцев интродуцентов являются не только качественные показатели, такие как всхожесть семян и выживаемость полученных сеянцев в течение вегетационного периода, но и количественные биометрические показатели сеянцев в 1-й год их роста. Исследованиями установлено, что биометрические показатели сеянцев ели – диаметр у корневой шейки и высота надземной части – характеризуются широким диапазоном изменчивости [3].

Особенностью лесопитомнического хозяйства является интенсивное механическое и химическое воздействие на почву, что часто приводит к ее деградации и нарушению протекания в ней естественных процессов биологического круговорота. В результате почвы обедняются гумусом и минеральными элементами питания, ухудшаются их водно-физические, воздушные и биологические свойства, нарушается структура, как следствие, снижается продуктивность посевов и уменьшаются размеры сеянцев [12]. При этом, с точки зрения почвоведения, развитие сеянцев лимитируют всего 2 фактора: плотность сложения почвы и содержание в ней обменного калия. Влияние этих факторов отражается в наибольшей степени, когда из 3 значений, соответствующих разным слоям почвы, взято минимальное [4].

В настоящее время при выращивании сеянцев наиболее эффективным методом увеличения ростовых показателей является внесение различных типов удобрений, в особенности азотистых. Исследование влияния карбамид-формальдегидного удобрения на ростовые показатели некоторых видов хвойных выявило, что внесение данного типа удобрения увеличивает высоту сеянцев до 80–90 %, а диаметр стволика на 50–60 % [18].

В связи с недостаточным количеством традиционных органических удобрений и высокой стоимостью минеральных становится актуальной разработка технологий производства местных удобрений из доступного органического сырья и нетрадиционных удобрений, а также их использование в лесном хозяйстве [13]. Основным субстратом для выращивания сеянцев в теплицах служит фрезерный торф, но могут также использоваться отходы лесоперерабатывающей промышленности – компостируемый гидролизный лигнин, компостируемая кора хвойных пород и смеси компостируемой коры с торфом (обычно 50 % торфа, 50 % компоста) [8]. Обработка сеянцев лиственницы европейской и



ели колючей в условиях закрытого грунта оксидантом торфа существенно увеличивает их биометрические и весовые показатели. Сеянцы лиственницы, обработанные оксидантом торфа, имели корневые шейки в 1,7 раза и накопление фитомассы в 5 раз выше по сравнению с контрольным вариантом [16].

Одним из новых экологических способов получения сеянцев является добавление древесных остатков, которые увеличивают сохранность проростков при их прорастании [26], при этом генотипы семян значительно коррелируют с физико-химическими свойствами материнской почвы [24]. Еще более перспективным может стать использование нетрадиционных удобрений в совокупности с введением биоактивизирующих добавок. Так, применение подобных добавок на стадии созревания компостной смеси в Мушмаринском лесном питомнике достоверно повысило содержание нитратного азота лишь при внесении нетрадиционного органического удобрения, полученного при помощи активаторов разложения стерни и активаторов почвенной микрофлоры [9].

Разработка системы мер по интенсификации выращивания посадочного материала хвойных пород с использованием в качестве органических удобрений компостов на основе древесной коры является важным звеном в повышении выхода стандартного посадочного материала. Ряд ученых на протяжении последних 10-летий отмечают целесообразность совместного применения в лесных питомниках минеральных и органических удобрений в виде компостов. Компостирование органических отходов является распространенным способом получения высокоэффективных органических удобрений. Дополнительный экономический эффект при этом дает утилизация большого количества отходов лесной и деревообрабатывающей промышленности [11, 17, 31].

Цель исследования – изучение возможности добавления хвойного опада в почвенный субстрат и влияния длительности и типа стратификации для повышения всхожести семян и получения хвойных сеянцев с закрытой корневой системой при их интродукции в сухие аридные условия Центрального Казахстана.

#### *Объекты и методы исследования*

Исследования влияния хвойного опада на всхожесть семян проводились на базе учебно-опытного участка дендропитомника Биолого-географического факультета Карагандинского университета им. Е.А. Букетова в 2017–2018 г. Объектом исследования стали семена 24 видов хвойных растений семейства *Pinaceae* (Lindl.), относящихся к 4 родовым таксономическим группам: 12 видов рода *Pinus* A.Dietr., 2 – *Abies* Mill., 9 – *Pinus* L., 1 – *Pseudotsuga* Carr. Семена получены в сентябре по обмену между Московским лесным питомником и Биолого-географическим факультетом Карагандинского университета.

Масса 1000 семян определялась согласно ГОСТ 13056.4–67 с расчетом среднего отклонения каждой пробы. Влажность устанавливалась при помощи анализатора ОНАУС MB23 и методик, рекомендуемых к данному анализатору (табл. 1).

В рамках исследования использовались 3 вариации:

Контроль 1 – осенний посев в субстрат без использования хвои, с естественной стратификацией;

Контроль 2 – весенний посев в субстрат без использования хвои, с искусственной стратификацией;

Опытная – весенний посев в субстрат с добавлением хвои, с искусственной стратификацией.

Таблица 1

**Масса и влажность 1000 семян видов семейства *Pinaceae* Lindl.  
Weight and moisture content of 1000 seeds of *Pinaceae* Lindl.**

Вид	Масса, г	Влажность, %
<i>Picea jezoensis</i> (Siebold & Zucc.)	1,83±0,09	4,7
<i>P. orientalis</i> (L.)	7,24±0,12	2,4
<i>P. smithiana</i> (Wall.)	13,48±0,22	4,4
<i>P. glauca</i> (Moench) Voss	2,48±0,04	3,2
<i>P. koyamai</i> Shiras.	5,24±0,19	3,2
<i>P. pungens</i> Engelm.	2,86±0,15	2,5
<i>P. purpurea</i> Mast.	3,94±0,57	4,8
<i>P. omorika</i> (Pancic)	2,78±0,12	4,4
<i>P. sitchénsis</i> (Bong.)	2,29±0,02	7,6
<i>P. asperata</i> Mast.	3,64±0,68	3,9
<i>P. schrenkiána</i> Fisch. & C.A.Mey.	7,35±0,09	5,6
<i>P. engelmannii</i> (Parry ex Engelm.)	3,92±0,85	6,1
<i>Ábies sachalinensis</i> (F.Schmidt)	8,23±0,73	5,0
<i>A. balsamea</i> (L.)	8,63±0,42	5,1
<i>Pinus nigra</i> J.F.Arnold	3,27±0,24	4,0
<i>P. banksiana</i> Lamb.	4,23±0,35	4,3
<i>P. stróbus</i> L.	20,05±0,24	3,0
<i>P. wallichiana</i> A.B.Jacks.	5,34±0,42	4,5
<i>P. mugo</i> Turra	11,71±0,11	3,2
<i>P. densiflóra</i> Siebold et Zucc.	12,93±0,15	4,0
<i>P. ponderósa</i> Douglas	63,48±5,24	3,2
<i>P. aristata</i> Engelm.	5,24±0,63	3,7
<i>P. contorta</i> Douglas	6,89±0,49	2,8
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.)	7,12±0,10	3,8

После взвешивания семена вариаций Контроль 2 и Опытная закладывались на хранение в бумажные пакеты. Хранение семян осуществлялось при температуре 15 °С в течение 7 мес. Перед посевом семена этих вариаций были подвергнуты холодной стратификации во влажном песке в течение 1 мес. при температуре 4 °С (холодильная камера) [15]. Семена вариации Контроль 1 оставались на осеннюю стратификацию в стратификационной яме глубиной 45 см. Дно ямы было засыпано крупным гравием, а сверху накладывались щиты из OSB. Сверху яма накрывалась травяным опадом для защиты семян от сильных морозов.

Для опытов использовались пластиковые ящики размером 55×14×15 см без дренажа. В качестве субстрата взята почвенная смесь из грунта испытательного участка и опилок в соотношении 3:1. В начале опыта проведен анализ почвы на базе Испытательной лаборатории «ЭкоНус» (г. Караганда). Используемую почву можно охарактеризовать как малогумусную, нейтральную, с низким содержанием токсичных соединений солей.

Результаты анализа химического состава 100 г грунта следующие:

Гидрокарбонат-ион.....	52/0,85 мг/мг-экв
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .....	0,75 мг-экв
Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .....	0,1 мг-экв
NaHCO <sub>3</sub> .....	—
Сульфат-ион.....	22/0,46 мг/мг-экв
CaSO <sub>4</sub> .....	—
MgSO <sub>4</sub> .....	—
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	0,46 мг-экв
Хлорид-ион.....	1/0,03 мг/мг-экв
CaCl <sub>2</sub> .....	—
MgCl <sub>2</sub> .....	0,3 мг-экв
NaCl.....	—
Нитрат-ион.....	1,2/0,01 мг/мг-экв
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .....	—
NaNO <sub>3</sub> .....	0,1 мг-экв
Кальций-ион.....	15/0,75 мг/мг-экв
Магний-ион.....	2/0,13 мг/мг-экв
Натрий-ион.....	11/0,47 мг/мг-экв
Соли.....	0,104 %
Растворимость.....	52 мг/дм <sup>3</sup>
Гумус.....	1,67 %
pH.....	7,58

В ящики с опытными семенами на поверхность почвенной смеси вносился хвойный опад *P. obovata* (Ledeb.). Верхний слой хвойного опада толщиной не более 0,5 см, возрастом не старше 1 года, не имеющий следов гниения, собирался в искусственных посадках *P. obovata* (Ledeb.) в октябре 2017 г. в 3,5 км к северу от пос. Катарколь (Акмолинская область), в государственном национальном природном парке «Бурабай». Хранение хвойного опада осуществлялось в матерчатом мешке объемом 5 л при температуре 22–24 °С. В ящики опад вносился в виде цельной хвои в объеме 1,3 г/ящик, или 17 г/м<sup>2</sup>. В ящики с контрольными семенами хвойный опад не добавлялся.

Семена в ящиках высевались по 50 семян в ряд в 4-кратной повторности. Сверху семена накрывались слоем древесной стружки толщиной 1,5–2 см. Грунтом семена не накрывались. После посева ящики с семенами помещались в солнцезащитную загородку без дополнительного укрытия. Полив семян осуществлялся ежедневно в вечернее время при помощи лейки с нормой полива 9 л/м<sup>2</sup>. Полив сеянцев в июне–июле производился 1 раз в 2 дня с нормой полива 15 л/м<sup>2</sup>. В дни с температурой воздуха выше +30 °С – ежедневно без нормирования воды. В августе–сентябре – 1 раз в 3 дня без нормирования воды [7].

Климат в районе исследования резко континентальный. В период наблюдения средняя дневная температура была на 1,9 °С ниже средней дневной температуры за последние 10 лет. Средняя минимальная температура – на 3,8 °С выше средней минимальной за последние 10 лет. Данные для сравнения взяты в Карагандинском филиале Казгидромета. Преобладали юго-западные и северо-западные ветра, которые составили 60 % от общего распределения направ-

лений ветра по розе ветров. Климатические показатели для района исследования за весь период его проведения следующие:

Средняя дневная температура .....	18,2±6,1 °С
Максимальная температура .....	31,0 °С
Средняя ночная температура .....	10,8±3,7 °С
Минимальная температура.....	2,0 °С
Средняя влажность .....	59,6±16,0 %
Облачность .....	3,35±2,96 балла
УФ-индекс .....	3,21±1,66
Количество дождливых дней .....	7
Осадки .....	195 мм

Влияние изучаемых факторов оценивалось по 3 критериям: энергии прорастания, всхожести и энергии покоя семян. Энергия прорастания семян определялась на 20-е сут. после посева, всхожесть и энергию покоя – на 30-е сут. Всхожесть и энергия прорастания семян устанавливались согласно пункту 5 подпункту 5.4.5 ГОСТ 50617–93. Энергия покоя семян находилась по формуле

$$P = \frac{a_1 t_1 + a_2 t_2 + \dots + a_n t_n}{a_1 + a_2 + \dots + a_n},$$

где  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – дни от начала проращивания семян;  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – число семян, проросших в соответствующие дни [2].

Статистическая обработка результатов проводилась по методикам Н.Л. Удальцовой и Г.Ф. Лакина [6, 14] с применением программного пакета Microsoft Excel 2010. Расчет достоверности разницы показателей осуществлялся с использованием коэффициента Стьюдента и ошибки средней величины по таблице Н.А. Плохинского. Корреляционный анализ значений высоты проростков и длины хвои выполнялся с применением коэффициента корреляции Пирсона.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Датой начала наблюдения за прорастанием семян вариации Контроль 1 стало 11 мая 2018 г., когда впервые средняя дневная температура составила +15 °С, т. е. достигла наиболее благоприятного для прорастания семян значения [1, 21]. Вариация Контроль 1 была введена в эксперимент в целях получения контрольного показателя влияния естественной стратификации семян по сравнению с искусственной, которая рекомендуется во всех лесопитомниках [7, 20].

Сопоставление энергии прорастания семян показало, что наибольшее количество видов, у которых были зарегистрированы прорастания семян, относится к вариации Контроль 1 – 21 вид (87,5 %). В вариациях Контроль 2 и Опытная было отмечено одинаковое количество видов с проросшими семенами – 16 видов (66,6 %). Однако в этих вариациях только в 3 случаях наблюдаются наибольшие показатели энергии прорастания (*Picea smithiana* (Wall.), *P. orientalis* (L.), *P. pungens* Engelm.). У 15 видов из 24 (62,5 %), для которых хотя бы в 2 вариациях были зафиксированы прорастания, наибольшая относительная энергия прорастания наблюдалась в вариации Контроль 1 (табл. 2).

Несмотря на относительно однозначные результаты по энергии прорастания, сопоставление результатов влияния хвойного опада на всхожесть семян показало изменение тенденции отзывчивости семян к изучаемому фактору.

Таблица 2

Энергия прорастания семян хвойных (%)  
Germination energy of coniferous seeds, %

Вид	Контроль 1	Контроль 2	Опытная вариация
<i>Picea jezoensis</i> (Siebold & Zucc.)	18,3	20,8	9,8
<i>P. orientalis</i> (L.)	0	14,0	3,3
<i>P. smithiana</i> (Wall.)	0	1,3	4,3
<i>P. glauca</i> (Moench) Voss	26,6	21,0	10,3
<i>P. koyamai</i> Shiras.	12,5	10,8	8,0
<i>P. pungens</i> Engelm.	9,0	24,0	15,0
<i>P. purpurea</i> Mast.	18,3	5,3	16,0
<i>P. omorika</i> (Pancic)	24,1	9,3	3,8
<i>P. sitchénsis</i> (Bong.)	25,0	11,3	3,5
<i>P. asperata</i> Mast.	10,0	0	9,5
<i>P. schrenkiána</i> Fisch. & C.A.Mey.	9,2	8,0	0
<i>P. engelmannii</i> (Parry ex Engelm.)	0,8	0	0
<i>Ábies sachalinensis</i> (F.Schmidt)	3,3	0	0
<i>A. balsamea</i> (L.)	8,3	0	0
<i>Pinus nigra</i> J.F.Arnold	18,3	13,5	7,8
<i>P. banksiana</i> Lamb.	42,5	12,0	25,5
<i>P. stróbus</i> L.	10,0	0	0
<i>P. wallichiana</i> A.B.Jacks.	10,0	0	0
<i>P. mugo</i> Turra	45,0	16,7	30,8
<i>P. densiflóra</i> Siebold et Zucc.	27,5	6,0	23,5
<i>P. ponderósa</i> Douglas	0	0	0
<i>P. aristata</i> Engelm.	36,6	8,0	10,0
<i>P. contorta</i> Douglas	45,0	25,8	36,0
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.)	25,8	11,8	0

Так, для 6 видов с наилучшей энергией прорастания в вариации Контроль 1 наибольшая всхожесть семян была отмечена в Опытной вариации. У 3 видов наилучшая всхожесть зафиксирована в вариации Контроль 2. Данная тенденция прослеживается для представителей рода *Picea* A.Dietr. У представителей рода *Pinus* L. наибольшие показатели всхожести семян отмечены в вариации Контроль 1. Таким образом, исследование выявило, что добавление в почву хвойного опада относительно положительно влияет на всхожесть семян, в особенности на представителей рода *Picea* A.Dietr.

В опытной вариации у 18 видов (75,0 %) отмечено прорастание семян, что сопоставимо с количеством видов, у которых наблюдалось прорастание семян при осенней стратификации (20 видов – 83,3 %). В вариациях Контроль 1 и Опытная количество видов с всхожестью семян выше 50 % относительно одинаково: 8 видов (33,3 %) для вариации Контроль 1 и 6 видов (25,0 %) для вариации Опытная (табл. 3).

Таблица 3

**Абсолютные и относительные показатели всхожести семян хвойных**  
**Absolute and relative rates of germination of coniferous seeds**

Вид	Контроль 1		Контроль 2		Опытный вариант	
	число взошедших семян	% всхо- жести	число взошедших семян	% всхо- жести	число взошедших семян	% всхо- жести
<i>Picea jezoensis</i> (Siebold & Zucc.)	19,0±4,3	38,0	31,0±3,1	62,0	11,3±3,3	22,5
<i>P. orientalis</i> (L.)	0	0	21,8±1,9	43,5	5,3±0,8	10,5
<i>P. smithiana</i> (Wall.)	0	0	1,5±1,2	3,0	10,3±2,4	20,5
<i>P. glauca</i> (Moench) Voss	31,0±4,3	62,0	32,8±3,0	65,5	16,0±1,6	32,0
<i>P. koyamai</i> Shiras.	12,8±4,4	25,5	15,5±2,3	31,0	17,3±2,3	34,5
<i>P. pungens</i> Engelm.	9,8±2,5	19,5	34,8±1,9	69,5	25,0±3,5	50,0
<i>P. purpurea</i> Mast.	23,5±9,9	47,0	5,3±3,0	10,5	24,8±2,4	49,5
<i>P. omorika</i> (Pancic)	24,0±5,9	48,0	11,0±5,3	22,0	10,3±1,1	20,5
<i>P. sitchénsis</i> (Bong.)	25,8±6,0	51,5	14,5±5,2	29,0	9,3±2,3	18,5
<i>P. asperata</i> Mast.	10,0±2,1	20,0	6,0±1,6	12,0	21,0±6,0	42,0
<i>P. schrenkiána</i> Fisch. & C.A.Mey.	9,3±1,7	18,5	11,3±3,8	22,5	6,3±1,3	12,5
<i>P. engelmannii</i> (Parry ex Engelm.)	0,8±0,5	1,5	3,3±1,3	6,5	0	0
<i>Abies sachalinensis</i> (F.Schmidt)	3,0±0	6,0	7,5±1,7	15,0	0	0
<i>A. balsamea</i> (L.)	8,3±5,4	16,5	1,3±1,3	2,5	0	0
<i>Pinus nigra</i> J.F.Arnold	23,5±11,3	47,0	13,5±3,5	27,0	13,0±1,6	26,0
<i>P. banksiana</i> Lamb.	42,5±7,6	85,0	17,3±2,9	34,5	44,0±3,5	88,0
<i>P. strobus</i> L.	12,5±2,9	25,0	2,5±2,1	5,0	0	0
<i>P. wallichiana</i> A.B.Jacks.	0	0	0	0	10,0±6,2	200,0
<i>P. mugo</i> Turra	45,0±5,4	90,0	20,3±10,1	40,5	42,0±3,5	84,0
<i>P. densiflóra</i> Siebold et Zucc.	27,8±11,7	55,5	6,0±3,7	12,0	35,8±5,3	71,5
<i>P. ponderósa</i> Douglas	0	0	0	0	0	0
<i>P. aristata</i> Engelm.	42,5±8,3	85,0	13,3±2,9	26,5	13,0±4,5	26,0
<i>P. contorta</i> Douglas	45,0±5,4	90,0	38,3±4,3	76,5	45,3±4,9	90,5
<i>Pseudotsuga</i> <i>menziesii</i> (Mirb.)	27,5±3,6	55,0	14,3±3,0	28,5	0	0

Наибольшее количество видов с всхожими семенами было отмечено в вариации Контроль 2 (22 вида, или 91,6 %). Однако только в 6 случаях в данной вариации выявлена наибольшая всхожесть семян среди всех исследуемых вариаций. В вариации Контроль 2 только у 3 видов всхожесть семян была выше максимальных значений энергии прорастания, зафиксированных у данных видов в вариации Контроль 1 (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.), *P. glauca* (Moench), *P. schrenkiana* Fisch. & C.A. Mey.).



Анализируя количество видов с показателями всхожести семян выше 80 % можно заключить, что осенняя стратификация наиболее положительно по сравнению с весенней влияет на всхожесть семян. Так, в вариации Контроль 1 количество видов с всхожестью семян выше 80 % составило 4 (16,6 %). Все данные виды были представителями рода *Pinus* L. В Опытной вариации у 3 видов выявлена всхожесть семян выше 80 %, у 1 вида данный показатель превысил 90 % (*Pinus contorta* Douglas).

Расчет достоверности разницы абсолютной всхожести семян показал, что в Опытной вариации есть только 10 случаев из 40 (25,0 %), когда всхожесть семян была достоверно выше этого показателя в других вариациях. Между вариациями Опытная и контрольными не наблюдалось достоверных различий всхожести семян. Можно сделать вывод о том, что внесение в субстрат хвойного опада имеет индивидуальное влияние на всхожесть семян (табл. 4).

Таблица 4

**Достоверность разницы всхожести семян между вариантами исследования**  
**The confidence intervals for seed germination rates between the experimental variants**

Вид	Контроль 1 и Контроль 2	Контроль 1 и Опытная вариация	Контроль 2 и Опытная вариация
<i>Picea jezoensis</i> (Siebold & Zucc.)	p < 0,01	p < 0,05	p < 0,001
<i>P. orientalis</i> (L.)	x	x	p < 0,001
<i>P. smithiana</i> (Wall.)	x	x	p < 0,01
<i>P. glauca</i> (Moench) Voss	-/-	p < 0,01	p < 0,001
<i>P. koyamai</i> Shiras.	-/-	-/-	-/-
<i>P. pungens</i> Engelm.	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,01
<i>P. purpurea</i> Mast.	p < 0,05	-/-	p < 0,01
<i>P. omorika</i> (Panic)	p < 0,05	p < 0,01	-/-
<i>P. sitchénsis</i> (Bong.)	p < 0,05	p < 0,01	-/-
<i>P. asperata</i> Mast.	-/-	p < 0,05	p < 0,01
<i>P. schrenkiána</i> Fisch. & C.A.Mey.	-/-	-/-	-/-
<i>P. engelmannii</i> (Parry ex Engelm.)	p < 0,05	x	x
<i>Ábies sachalinensis</i> (F.Schmidt)	p < 0,01	x	x
<i>A. balsamea</i> (L.)	-/-	x	x
<i>Pinus nigra</i> J.F.Arnold	-/-	-/-	-/-
<i>P. banksiana</i> Lamb.	p < 0,01	-/-	p < 0,001
<i>P. stróbus</i> L.	p < 0,01	x	x
<i>P. wallichiana</i> A.B.Jacks.	xxx	xxx	xxx
<i>P. mugo</i> Turra	p < 0,01	-/-	p < 0,05
<i>P. densiflóra</i> Siebold et Zucc.	p < 0,05	-/-	p < 0,001
<i>P. ponderósa</i> Douglas	xxx	xxx	xxx
<i>P. aristata</i> Engelm.	p < 0,01	p < 0,01	-/-
<i>P. contorta</i> Douglas	-/-	-/-	-/-
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.)	p < 0,01	x	x

Примечание: -/- – достоверная разница показателей между вариациями отсутствует; x, xxx – уровень достоверности не рассчитывается в связи с отсутствием данных соответственно у одной из вариаций и в обеих вариациях.

Сравнивая результаты расчета достоверности разницы показателей между вариациями Контроль 1 и Контроль 2, мы установили, что осенняя стратификация имеет большее влияние на показатель всхожести семян по сравнению с весенней. Так, из 20 видов у 9 (45,0 %) всхожесть семян в вариации Контроль 1 достоверно выше, чем в вариации Контроль 2 (4 вида, или 20,0 %). При этом у 7 видов (35,0 %) не было выявлено достоверного различия всхожести семян в данных вариациях.

Следует отметить, что из 9 видов рода *Picea* A.Dietr. только у 3 всхожесть семян в вариации Контроль 1 достоверно выше показателя в вариации Контроль 2. Все виды рода *Pinus* L. вариации Контроль 1 имеют всхожесть семян достоверно более высокую, чем в вариации Контроль 2.

Несмотря на относительно выверенные данные о значениях всхожести семян, одним из немаловажных показателей в условиях недлительного благоприятного температурного весеннего периода для характеристики прорастания семян является скорость этого процесса. В регионе засушливых степей Центрального Казахстана средняя дневная температура составляет +18–22 °С на протяжении 15–22 дн. Скорость прорастания семян в этот период является важным фактором, оказывающим влияние на показатель всхожести семян.

Расчет энергии покоя семян в вариации Контроль 1 был затруднен невозможностью установления точки начала процессов прорастания семян. Поэтому в данный анализ включены только результаты, полученные в вариациях Контроль 2 и Опытная. Анализ результатов определения данного показателя позволил установить, что 15 видов из 21 (68,2 %) имеют наименьшую энергию покоя семян. Это свидетельствует о быстрой скорости прорастания данных семян. Однако из значительного разброса в скорости прорастания – от 9 у *Picea omorika* (Pancic) до 22,8 сут. у *Pinus strobus* L. – следует, что при осенней стратификации весной семена прорастают неравномерно относительно средней дневной температуры, это в свою очередь значительно тормозит процесс прорастания при установлении температурных параметров выше определенных значений. Данный вывод требует дополнительных исследований биологии прорастания семян хвойных растений в зависимости от температурных параметров. В вариации Контроль 2 только у 4 видов (19,0 %) были отмечены минимальные значения энергии покоя семян. В Опытной вариации таких видов было выделено всего 2 (9,5 %) (табл. 5).

Расчет энергии покоя семян по вариациям Контроль 2 и Опытная показал, что из 17 видов, для которых были отмечены прорастания семян в обеих вариациях, у 10 (64,7 %) наибольшая энергия покоя семян была зафиксирована в вариации Контроль 2. Хотя в целом данный показатель в этой вариации значительно ниже по сравнению с остальными. Разница в вариации Контроль 2 по времени начала прорастания семян между образцами с наибольшей и наименьшей энергией покоя могла достигать 5–6 сут. У 9 видов (5 представителей рода *Picea* A.Dietr. и 4 – *Pinus* L.) наилучшие показатели энергии покоя семян положительно коррелируют с показателями всхожести семян.

Внесение хвойного опада по-разному отражается на показателях прорастания семян из-за различного влияния содержащихся в хвое соединений терпенов и фенолов на прорастающие семена того или иного вида [10]. Также А.В. Егоровой и Н.П. Чернобровкиной было установлено, что вещества хвои снижают соотношение N/P в молодых проростках [5]. В целом внесение хвойного опада значительно увеличивает период прорастания семян.

Таблица 5

**Энергия покоя семян (сут.)**  
**Rest energy of seeds (24-hour period)**

Вид	Контроль 2	Опытная вариация
<i>Picea jezoensis</i> (Siebold & Zucc.)	19,23	18,38
<i>P. orientalis</i> (L.)	19,38	19,33
<i>P. smithiana</i> (Wall.)	19,00	20,49
<i>P. glauca</i> (Moench) Voss	19,19	18,66
<i>P. koyamai</i> Shiras.	18,27	20,26
<i>P. pungens</i> Engelm.	16,06	19,59
<i>P. purpurea</i> Mast.	16,14	19,68
<i>P. omorika</i> (Pancic)	15,11	21,32
<i>P. sitchensis</i> (Bong.)	17,84	20,30
<i>P. asperata</i> Mast.	23,71	21,05
<i>P. schrenkiana</i> Fisch. & C.A.Mey.	18,07	23,72
<i>P. engelmannii</i> (Parry ex Engelm.)	24,08	xx
<i>Abies sachalinensis</i> (F.Schmidt)	24,40	xx
<i>A. balsamea</i> (L.)	21,60	xx
<i>Pinus nigra</i> J.F.Arnold	14,14	19,27
<i>P. banksiana</i> Lamb.	18,14	18,80
<i>P. strobus</i> L.	23,70	xx
<i>P. wallichiana</i> A.B.Jacks.	xx	xx
<i>P. mugo</i> Turra	16,14	18,51
<i>P. densiflora</i> Siebold et Zucc.	16,13	17,97
<i>P. ponderosa</i> Douglas	xx	xx
<i>P. aristata</i> Engelm.	18,85	18,04
<i>P. contorta</i> Douglas	19,12	17,07
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.)	17,81	xx

Примечание: xx – нет данных из-за отсутствия всходов.

В некоторых случаях, как например с *Picea sitchensis* (Bong.), *P. engelmannii* (Parry ex Engelm.), *P. schrenkiana* Fisch. & C.A. Mey., можно говорить о подавлении процессов прорастания семян, так как у данных видов не только низкие показатели всхожести семян, но и высокие показатели энергии покоя.

### Заключение

В результате проведенных исследований можно заключить, что различия в стратификации и внесение хвойного опада по-разному влияют на всхожесть семян в условиях засушливых степей Центрального Казахстана и зависят от принадлежности вида к тому или иному роду. На прорастаемость семян представителей рода *Picea* A.Dietr. и *Abies* Mill. наибольшее положительное действие оказывает весенняя стратификация семян в течение 1 мес. Осенняя стратификация наиболее благоприятна для семян представителей рода *Pinus* L. и *Pseudotsuga* Carr.

Индивидуальный характер влияния на всхожесть внесения хвойного опада особенно проявляется на примере *Picea purpurea* Mast., *P. asperata* Mast., *Pinus banksiana* Lamb., *P. densiflora* Siebold et Zucc., так как у них отмечена наибольшая всхожесть семян в 2 вариантах опыта – как с внесением хвои, так и без него – по сравнению со значением показателя в вариации без внесения хвои. Однако в целом данный фактор имеет негативное влияние на всхожесть семян.

В заключение можно сделать вывод, что, несмотря на более высокую энергию прорастания семян в вариации с осенней стратификацией, данный вид стратификации не оказывает значительного воздействия на семена при их прорастании, что выражается в снижении динамики прорастания и в конечном итоге влияет на показатели всхожести.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бородина Н.А., Комаров И.А., Лапин П.И. Семенное размножение интродуцированных древесных растений / отв. ред. П.И. Лапин. М.: Наука, 1970. 319 с.  
Borodina N.A., Komarov I.A., Lapin P.I. *Seed Propagation of Introduced Woody Plants*. Ed. by P.I. Lapin. Moscow, Nauka Publ., 1970. 319 p. (In Russ.).
2. Бурченко Т.В., Лазарев А.В. Особенности прорастания семян *Geum urbanum* L. // Науч. вед. БелГУ. Сер.: Естеств. науки. 2010. № 3(74). С. 13–18.  
Burchenko T.V., Lazarev A.V. Features of Germination of Seeds *Geum urbahum* L. *Nauchnyye vedomosti BelGU. Seriya: Estestvennyye nauki* = Regional Geosystems, 2010, no. 3(74), pp. 13–18. (In Russ.).
3. Гожан Н.Я., Гузь Н.М. Особенности выращивания посадочного материала *Picea pungens* 'glauca' семенным способом // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. 2015. Т. 18, № 18. С. 12–16.  
Gozhan N.Ya., Guz' N.M. Features of Growing Planting Material of *Picea pungens*, "Glauca", by seed method. *Plodovodstvo, semenovodstvo, introduktsiya drevesnykh rasteniy*, 2015, vol. 18, no. 18, pp. 12–16. (In Russ.).
4. Демаков Ю.П., Митякова И.И. Пространственная неоднородность почвенного агрофона лесного питомника и ее влияние на биометрические показатели сеянцев // Вестн. МарГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 2. С. 68–75.  
Demakov Yu.P., Mityakova I.I. Spatial Heterogeneity of Soil Agricultural Background of Forest Nursery and Its Influence on Biometrics Parameters of Seedlings. *Vestnik of Mari State Technical University. Series "Forest. Ecology. Nature management"*, 2011, no. 2, pp. 68–75. (In Russ.).
5. Егорова А.В., Чернобровкина Н.П., Робонен Е.В. Влияние хвойного препарата на рост и элементный состав сеянцев *Pinus sylvestris* L. в условиях лесного питомника // Химия растит. сырья. 2017. № 2. С. 171–180.  
Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. Effects of Application of a Conifer-Derived Chemical on the Growth and Elemental Composition of *Pinus sylvestris* L. Seedlings in a Forest Nursery. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*, 2017, no. 2, pp. 171–180. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2017021720>
6. Катмаков П.С., Гавриленко В.П., Бушов А.В. Биометрия / под общ. ред. П.С. Катмакова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2019. 177 с.  
Katmakov P.S., Gavrilenko V.P., Bushov A.V. *Biometrics*. Ed. by P.S. Katmakov. Moscow, Urait Publ., 2019. 177 p. (In Russ.).

7. Лагутина А.И., Соснин Н.А., Карпцов Н.С. Поливной режим однолетних посевов сосны и березы в питомниках Северного Казахстана // Защитное лесоразведение и вопросы селекции в Северном Казахстане: сб. науч. тр. КазНИИЛХА. Т. XI. Алма-Ата: Кайнар, 1980. С. 72–79.

Lagutina A.I., Sosnin N.A., Karpstov N.S. Irrigation Regime of Annual Sowings of Pine and Birch in Nurseries of Northern Kazakhstan. *Protective Afforestation and Issues of Breeding in Northern Kazakhstan: Collection of Academic Papers of KazNILHA*. Alma-Ata, Kaynar Publ., 1980, vol. 11, pp. 72–79. (In Russ.).

8. Мочалов Б.А. Научное обоснование и разработка интенсивной технологии выращивания посадочного материала хвойных пород для лесовосстановления на Европейском Севере России: автореф. ... д-ра с.-х. наук. Архангельск, 2009. 40 с.

Mochalov B.A. *Scientific Substantiation and Development of Intensive Technology for Growing Planting Coniferous Material for Reforestation in the European North of Russia*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2009. 40 p. (In Russ.).

9. Мухортов Д.И., Романов Е.М., Мамаев А.А. Оптимизация технологических параметров производства нетрадиционных органических удобрений в лесных питомниках // Лесн. хоз-во. 2011. № 3. С. 21–23.

Mukhortov D.I., Romanov E.M., Mamaev A.A. Optimization of Technological Parameters to Produce Unconventional Organic Fertilizers in Forest Nurseries. *Lesnoye Khozyaystvo*, 2011, no. 3, pp. 21–23. (In Russ.).

10. Ожимова Е.В., Ущановский И.В., Белопухов С.Л., Шайхиев И.Г. Биостимуляторы на основе экстрактов хвои ели обыкновенной (*Picea abies* L.) для обработки семян льна // Вестн. технол. ун-та. 2016. Т. 19, № 21. С. 181–183.

Ozhimkova E.V., Uschapovsky I.V., Belopukhov S.L., Shaikhiyev I.G. Biostimulants Created by Extracts from Norway Spruce (*Picea abies* L.) Needles for the Treatment of Flax Seeds. *Bulletin of the Technological University*, 2016, vol. 19, no. 21, pp. 181–183. (In Russ.).

11. Патент 2662999 С1 РФ, МПК А01N 65/00. Способ получения стимулятора роста сосны обыкновенной: № 2017118750: заявл. 29.05.2017; опубл. 31.07.2018 / А.В. Егорова, Н.П. Чернобровкина, Е.В. Робонен.

Egorova A.V., Chernobrovkina N.P., Robonen E.V. *Method of Obtaining Growth Stimulator for Scots Pine*. Patent RF no. RU 2 662 999 C1, 2018. (In Russ.).

12. Романов Е.М., Мамаев А.А., Гордеева С.С. Деграция и восстановление плодородия почв лесных питомников Среднего Поволжья // Экология и леса Поволжья: сб. науч. ст. Вып. 2. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. С. 47–67.

Romanov E.M., Mamaev A.A., Gordееva S.S. Degradation and Recovery of Soil Fertility of Forest Nurseries in the Middle Volga Region. *Ecology and Forests of the Volga Region: Collection of Academic Papers*. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2002, iss. 2, pp. 47–67. (In Russ.).

13. Самошин С.Е. Разработка рекомендаций по совершенствованию технологии выращивания посадочного материала // Проблемы и перспективы студенческой науки. 2018. № 1(3). С. 44–45.

Samoshin S.E. Development of Recommendations for Improving the Technology of Growing Planting Material. *Problemy i Perspektivy Studencheskoy Nauki*, 2018, no. 1(3), pp. 44–45. (In Russ.).

14. Сиделев С.И. Математические методы в биологии и экологии: введение в элементарную биометрию. Ярославль: ЯрГУ, 2012. 140 с.

Sidelev S.I. *Mathematical Methods in Biology and Ecology: an Introduction to Elementary Biometrics*. Yaroslavl, YarSU Publ., 2012. 140 p. (In Russ.).

15. Сирман Д.Ю. Влияние длительности стратификации и активации перманганатом калия на прорастание семян некоторых видов хвойных древесных растений // Вестн. Караганд. ун-та. Сер.: Биология. Медицина. География. 2017. № 2(86). С. 89–96.



Sirman D.Y. Effect of Duration of Stratification and Activation of Potassium Permanganate on the Germination of Seeds of Some Species of Coniferous Plants. *Bulletin of the Karaganda University. Biology. Medicine. Geography series*, 2017, no. 2(86), pp. 89–96. (In Russ.).

16. Туник П.В. Использование новых стимуляторов роста при выращивании семян хвойных интродуцентов в условиях закрытого грунта // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесн. хоз-во. 2008. № 16. С. 223–226.

Tupik P.V. The Use of New Growth Promoters in Cultivation of Seedlings of Coniferous Introduced Species in Greenhouse Conditions. *Proceedings of BSTU. No. 1. Forestry*, 2008, no. 16, pp. 223–226. (In Russ.).

17. Тюкавина О.Н., Кунников Ф.А. Содержание минеральных элементов в фитомассе сосны обыкновенной и в древесине тополя бальзамического в г. Архангельске // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2015. № 3. С. 80–86.

Tyukavina O.N., Kunnikov F.A. The Content of Mineral Elements in the Phytomass of Scotch Pine and Balsam Poplar Wood in Arkhangelsk. *Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Natural Sciences"*, 2015, no. 3, pp. 80–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn2227-6572.2015.3.80>

18. Хузиахметов Р.Х., Сабиров А.М., Сафина А.Р., Бариев И.Ф. Технология пролонгированного азотного удобрения и оценка его влияния на биометрические показатели семян хвойных пород // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2011. № 17. С. 113–116.

Khuziakhmetov R.Kh., Sabirov A.M., Safina A.R., Bariyev I.F. The Technology of Prolonged Nitrogen Fertilization and Assessment of Its Effect on the Biometric Parameters of Coniferous Seedlings. *Vestnik Kazanskogo Tekhnologicheskogo Universiteta* = Bulletin of the Technological University, 2011, no. 17, pp. 113–116. (In Russ.).

19. Шиманюк А.П. Дендрология. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 264 с.

Shimanyuk A.P. *Dendrology*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. 264 p. (In Russ.).

20. Штукин С.С. Ускоренное выращивание сосны, ели и лиственницы на лесных плантациях. Минск: Право и экономика, 2004. 242 с.

Shtukin S.S. *Accelerated Cultivation of Pine, Spruce and Larch on Forest Plantations*. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2004. 242 p. (In Russ.).

21. Ямалеев М.М. Некоторые вопросы агротехники выращивания семян пихты в условиях Казахского Алтая // Массивное лесоразведение в Казахстане: рефераты науч.-производств. конф., Щучинск, 29 июля–3 авг. 1966 г. Алма-Ата: Кайнар, 1968. С. 59–66.

Yamaleev M.M. Several Issues of Agricultural Technology for Fir Seedling Cultivation in the Environment of the Kazakhstan Altai. *Massive Afforestation in Kazakhstan: Abstracts of the Scientific and Industrial Conference in Shchuchinsk Dated July 29 – August 3, 1966*. Almaty, Kaynar Publ., 1968, pp. 59–66. (In Russ.).

22. Abdulsalam O., Wagner K., Wirth S., Kunert M., David A., Kallenbach M., Boland W., Kothe E., Krause K. Phytohormones and Volatile Organic Compounds, Like Geosmin, in the Ectomycorrhiza of *Tricholoma vaccinum* and Norway Spruce (*Picea abies*). *Mycorrhiza*, 2020, vol. 31, pp. 173–188. <https://doi.org/10.1007/s00572-020-01005-2>

23. Bozhkov P.V., von Arnold S. Polyethylene Glycol Promotes Maturation But Inhibits Further Development of *Picea abies* Somatic Embryos. *Physiologia Plantarum*, 1998, vol. 104, iss. 2, pp. 211–224. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1040209.x>

24. Cendán C., Sampedro L., Zas R. The Maternal Environment Determines the Timing of Germination in *Pinus pinaster*. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, vol. 94, pp. 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.11.022>

25. Chrosciewicz Z. Site Conditions for Jack Pine Seeding. *Forestry Chronicle*, 1990, vol. 66, no. 6, pp. 579–584. <https://doi.org/10.5558/tfc66579-6>



26. Han A.R., Kim H.J., Jung J.B., Park P.S. Seed Germination and Initial Seedling Survival of the Subalpine Tree Species, *Picea jezoensis*, on Different Forest Floor Substrates Under Elevated Temperature. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 429, pp. 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.042>
27. Hay E.I., Charest P.J. Somatic Embryo Germination and Desiccation Tolerance in Conifers. *Somatic Embryogenesis in Woody Plants*. Vol. 4. Ed. by J.S. Mohan, P.K. Gupta, R.J. Newton. Dordrecht, Springer, 1999, pp. 61–69. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-3032-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3032-7_3)
28. Stasolla C., Yeung E.C. Recent Advances in Conifer Somatic Embryogenesis: Improving Somatic Embryo Quality. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2003, vol. 74, pp. 15–35. <https://doi.org/10.1023/A:1023345803336>
29. Uddin M.R., Keinonen-Mettala K., Dinus R.J. *Enhanced Germination of Norway Spruce Somatic Embryos*. IPC Technical Paper Series No. 343. Appleton, WI, IPC, 1989. 11 p.
30. Wagner R.G., Little K.M., Richardson B., McNabb K. The Role of Vegetation Management for Enhancing Productivity of the World's Forests. *Forestry*, 2006, vol. 79, iss. 1, pp. 57–79. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpi057>
31. Wallenda T., Kottke I. Nitrogen Deposition and Ectomycorrhizas. *New Phytologist*, 1998, vol. 139, iss. 1, pp. 169–187. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1998.00176.x>

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The author declares that there is no conflict of interest



Научная статья

УДК 674.05:620.16

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-116-125

## Совершенствование конструкции цепных пильных аппаратов

**А.Н. Заикин**<sup>✉</sup>, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID*: [Z-3172-2019](https://orcid.org/0000-0002-1831-6893).

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

**В.В. Сиваков**, *канд. техн. наук*; *ResearcherID*: [R-7264-2019](https://orcid.org/0000-0002-0175-9030).

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

**Е.В. Шевелева**, *канд. техн. наук*; *ResearcherID*: [H-2080-2019](https://orcid.org/0000-0002-1763-6932).

*ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1763-6932>

Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; [zaikin.anatolij@yandex.ru](mailto:zaikin.anatolij@yandex.ru)<sup>✉</sup>, [sv@bgitu.ru](mailto:sv@bgitu.ru), [elshev78@yandex.ru](mailto:elshev78@yandex.ru)

---

*Поступила в редакцию 23.12.21 / Одобрена после рецензирования 27.03.22 / Принята к печати 30.03.22*

---

**Аннотация.** В настоящее время на лесосечных работах бензопилами и лесозаготовительными машинами с помощью цепных рабочих органов выполняются срезание деревьев, удаление сучьев, деление хлыстов на сортименты. Повышение надежности и работоспособности цепных пильных аппаратов значительно увеличивает эффективность лесосечных работ. В связи с сокращением машинного объема лесозаготовок важное значение приобретает повышение эффективности использования бензопил и совершенствование их конструкции, в первую очередь цепного пильного аппарата для увеличения его надежности и срока службы. Снижение объемов выпуска, низкое качество отечественных бензопил привели к тому, что в настоящее время на лесозаготовках страны в основном применяются бензопилы импортного производства, несмотря на постоянный рост их цены и стоимости обслуживания. Это делает актуальными проблему совершенствования конструкции бензопил как отечественного, так и зарубежного производства и, как следствие, вопрос исследования конструкции цепных пильных аппаратов для научно-обоснованного увеличения их надежности и долговечности. Низкая надежность в работе и повышенный износ составляющих частей пильных аппаратов обусловлены несовершенством конструкции механизма натяжения пильной цепи. Современные конструкции механизма натяжения пильной цепи для обеспечения необходимого усилия натяжения требуют периодической остановки пилы. Цель работы – совершенствование конструкции механизма натяжения пильной цепи для обеспечения требуемого монтажного натяжения в процессе работы бензопилы, которое даст возможность повысить надежность и срок службы цепных пильных аппаратов. Предложены возможные пути изменения конструкции механизма натяжения пильной цепи, что позволит достичь ее автоматического натяжения в процессе работы бензопилы, снизить вероятность спадания пильной цепи и риск ранения оператора.

**Ключевые слова:** цепной пильный аппарат, пильные цепи, надежность цепного пильного аппарата, лесозаготовительное оборудование, натяжение цепи, механизм для натяжения пильной цепи, автоматическое натяжение пильной цепи

**Для цитирования:** Заикин А.Н., Сиваков В.В., Шевелева Е.В. Совершенствование конструкции цепных пильных аппаратов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 116–125. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-116-125>

Original article

## Design Improvement of the Forestry Chain Saws

*Anatolij N. Zaikin*<sup>✉</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Z-3172-2019](https://orcid.org/0000-0002-1831-6893),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

*Vladimir V. Sivakov*, Candidate of Engineering; ResearcherID: [R-7264-2019](https://orcid.org/0000-0002-0175-9030),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

*Elena V. Sheveleva*, Candidate of Engineering; ResearcherID: [H-2080-2019](https://orcid.org/0000-0002-1763-6932),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1763-6932>

Bryansk State Technological University of Engineering, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; [zaikin.anatolij@yandex.ru](mailto:zaikin.anatolij@yandex.ru)<sup>✉</sup>, [sv@bgitu.ru](mailto:sv@bgitu.ru), [elshev78@yandex.ru](mailto:elshev78@yandex.ru)

Received on December 23, 2021 / Approved after reviewing on March 27, 2022 / Accepted on March 30, 2022

**Abstract.** At the present time logging operations such as cutting, limbing and bucking of trees at the cutting areas are performed with chain saws. Therefore, the increase reliability and productivity of the power saws significantly improve the efficiency of the timber-harvesting operations. Since, the volume of harvest by logging machinery extensively decreases, the design improvement and the increase of the operational life of the chain saws become particularly relevant. In the Russian Federation the production volumes and the low quality of the domestic chain saws have led to the fact that the power-driven tools are mostly imported from abroad. The prices and the maintenance costs of the foreign goods rise constantly. Consequently, the cost of harvested wood increases also. This makes it urgent to implement the scientific and technological development for improvement of the existing designs of the chain saws. One of the main reasons of the component's failure and increased abrasiveness of the blades is the improper tension in the chain drive mechanism. The modern configuration of the chain drive system requires periodic switch off the power for the proper tensile force. Thus, the aim of the research is the modification of the chain drive mechanism for the proper tensile strain of the chain in the chain saws. The study describes several technical solutions for improvement, which provides the automated tensioning of the chain in the working process. It can reduce the possibility of chain slipping in the operational functioning and increase the safety of the operator.

**Keywords:** chain saw, saw chains, chain saw reliability, harvesting and logging machinery, chain tensile strain, chain drive mechanism, automated saw chain tensioning

**For citation:** Zaikin A.N., Sivakov V.V., Sheveleva E.V. Design Improvement of the Forestry Chain Saws. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 1, pp. 116–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-116-125>



*Введение*

Широкое применение в настоящее время на лесозаготовках нашей страны зарубежных машин и оборудования привело к тому, что отечественная техника почти не используется. Одна из причин такого положения дел – ее низкая надежность, поэтому задача разработки и внедрения новых надежных конструкций отечественной техники является актуальной.

Учитывая, что основная часть лесов в РФ произрастает в труднодоступной местности и использование лесозаготовительных машин в них затруднено или невозможно, а также то, что по своим конструктивным возможностям машины неспособны работать с крупномерными деревьями, широкое применение находят бензопилы. Многие леса в настоящее время арендованы частными предприятиями для заготовки растущей в них древесины в небольших объемах. Такие предприятия по своим возможностям не могут использовать лесозаготовительные машины и вынуждены проводить лесозаготовки при помощи бензопил [2, 3].

Бензопилы находят широкое применение при всех видах рубок леса и выполнении операций по обрезке сучьев, раскряжевке хлыстов [18, 24–26], это также подтверждает актуальность вопроса повышения работоспособности и долговечности бензопил. Их цепной пильный аппарат имеет ряд положительных качеств – высокую производительность, удобство в эксплуатации и др. Вместе с тем высокие уровень шума [15] и травмоопасность [19], низкий моторесурс составных частей являются основными недостатками пильных аппаратов как отечественного, так и зарубежного производства [14]. Цена инструмента и стоимость обслуживания импортных машин и оборудования постоянно растут, а следовательно, увеличивается себестоимость заготавливаемой древесины, что является еще одним аргументом в пользу необходимости совершенствования конструкции бензопил с целью повышения их надежности и эксплуатационных качеств [17, 20, 21]. Достижение этой цели возможно путем научно-обоснованного совершенствования механизма натяжения цепи [4, 16].

Одной из проблем, снижающих эффективность цепного пильного аппарата, является удлинение пильной цепи при работе, приводящее к ее спаданию и вынуждающее оператора периодически останавливать работу для натяжения пильной цепи, что уменьшает производительность.

Цель исследования – разработка конструкции устройства, которая даст возможность автоматически выполнять натяжение пильной цепи при работе бензопилы, уменьшить вероятность ее спадания и снизить износ деталей пильного аппарата, а следовательно, повысить эффективность работы за счет уменьшения простоев.

*Объекты и методы исследования*

Основные части пильного аппарата – пильная цепь, направляющая шина, ведущая звездочка, механизм натяжения пильной цепи и масляный насос. Пильная цепь непосредственно выполняет полезную работу, является наиболее нагруженной и в связи с износом постоянно растягивается, что вызывает износ и ведущей звездочки. Отсутствие постоянного натяжения пильной цепи интенсифицирует износ и поломки всех составных частей пильного аппарата. Кроме того, вытягивание пильной цепи в результате износа ее элементов нередко

приводит к соскакиванию цепи со звездочки или ее обрыву, а это повышает риск ранения оператора.

Для непрерывного качественного выполнения работы необходимо, чтобы пильная цепь имела требуемое усилие натяжения. При излишнем натяжении цепи увеличиваются ее нагрев и нагрев направляющей шины, из-за чего растет потребляемая энергия, теряется эффективность пильного устройства и появляется возможность его заклинивания. При слабом натяжении цепи существует вероятность выпрыгивания хвостовиков пильной цепи из паза шины, что может стать причиной поломки инструмента (выламывания хвостовиков, износа направляющих шины и зубьев ведущей звездочки) и необходимости остановки бензопилы [22, 23].

Современные конструкции механизма натяжения пильной цепи не позволяют провести ее натяжение однократно, требуют регулярных остановок работы и осуществления натяжения по мере вытягивания пильной цепи.

Анализ работ о надежности цепных пильных аппаратов лесозаготовительной техники [5–8] показал, что, несмотря на большой объем проведенных исследований, вопрос натяжения пильной цепи режущего цепного аппарата до конца не решен, предлагаемые устройства не обеспечивают автоматическое регулирование натяжения. Конструкции известных устройств требуют большого опыта и не всегда могут гарантировать необходимое усилие натяжения пильной цепи.

На основании проведенного анализа работ можно отметить, что в конструкции цепных пильных аппаратов существуют варианты устройств для натяжения пильной цепи [1, 9–12]. Например, у пилы Stihl MS-230 и ряда других модификаций есть винтовой механизм для быстрого натяжения пильной цепи (рис. 1) и обычный механизм (рис. 2). Первый, управление которым осуществляется с крышки пильного аппарата, представляет собой пластиковый корпус 1 с закрепленным в нем металлическим стопором 2, удерживающим винт 3 от продольного перемещения. На винте установлена гайка 4, связанная скобой 5 с тягой 6, перемещающей пильную шину. На винте также установлен червяк 7, получающий вращение от зубчатого колеса 8 за счет ручного механизма быстрого натяжения пильной цепи 9.

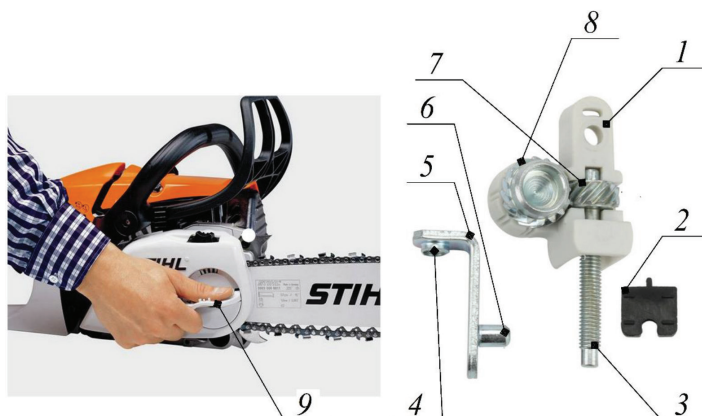


Рис. 1. Механизм для быстрого натяжения пильной цепи

Fig. 1. Mechanism for quick tensioning of the saw chain

Механизм обычного натяжения пильной цепи состоит из корпуса 1 с установленным в нем винтом 2, связанным с гайкой и тягой 3. Регулировка натяжения пильной цепи при помощи такого устройства осуществляется периодически с использованием отвертки.

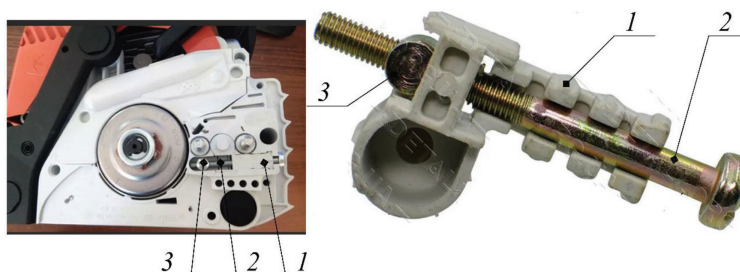


Рис. 2. Механизм для обычного натяжения пильной цепи

Fig. 2. Mechanism for normal tensioning of the saw chain

Наиболее простой конструкцией является винтовой механизм бензопилы «Тайга-245» (рис. 3) – это винт 1 с гайкой 2 и тягой 3. Регулировка натяжения пильной цепи в случае применения этой конструкции также осуществляется периодически с помощью отвертки.

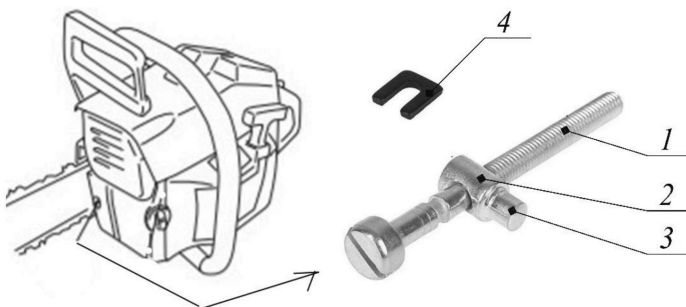


Рис. 3. Механизм натяжения пильной цепи бензопилы «Тайга-245»

Fig. 3. Mechanism for saw chain tensioning of the petrol-driven power saw "Taiga-245"

Основным недостатком рассмотренных вариантов конструкций является то, что при их использовании требуются периодическая остановка бензопилы по мере вытягивания пильной цепи и выполнение ее натяжения. В основном пильные шины выпускаются без подвижного элемента (ведомой звездочки), а натяжение пильной цепи производится посредством шины. Таким образом, использование конструкции автоматического натяжения пильной цепи для повышения ее надежности и срока службы является актуальной задачей.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Выявленные недостатки конструкций механизмов натяжения пильной цепи дали нам возможность разработать устройство, обеспечивающее автоматическое натяжение пильной цепи при закрепленной пильной шине (рис. 4) [13].



Предлагаемая конструкция позволит отказаться от вынужденной остановки бензопилы, уменьшит степень износа направляющей шины, звеньев пильной цепи и вероятность ее спадания, а следовательно, повысит надежность и срок службы цепных пильных аппаратов, а также эффективность использования цепных пил.

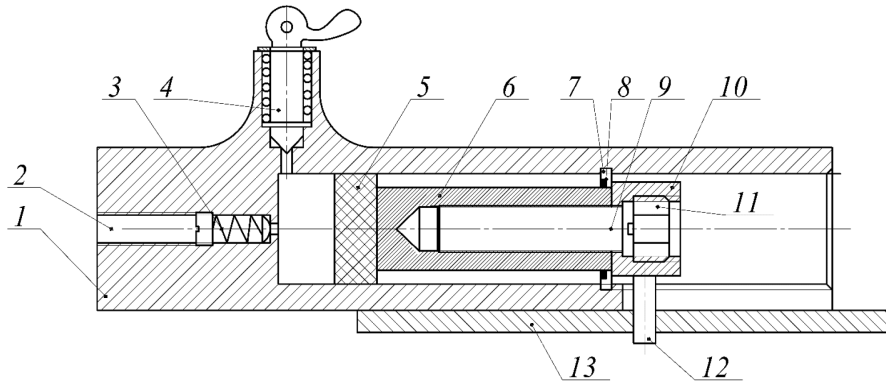


Рис. 4. Устройство для натяжения пильной цепи

Fig. 4. Saw chain tensioning device

Автоматическое натяжение пильной цепи достигается следующим образом. Механизм натяжения цепи включает натяжное устройство с маслоподводящим каналом 2 в корпусе пилы 1, нагнетательный канал 3 и предохранительный канал с перепускным клапаном 4, шток 6, жестко связанный с регулировочным винтом 9, обечайкой 10 и тягой 12 для непосредственного перемещения пильной шины.

Предлагаемое устройство работает следующим образом. Насосом мотопилы (на чертеже не показан) масло по маслоподводящему каналу через нагнетательный канал давит на манжету 5 и по мере нарастания давления вызывает перемещение штока с регулировочным винтом, который через стопорную гайку 11, обечайку и тягу перемещает пильную шину 13 по мере ослабления пильной цепи. Предохранительный канал с перепускным клапаном обеспечивает необходимое давление в системе, чем достигается постоянное нахождение манжеты 5 и тяги в переднем крайнем положении. Цифрами 7 и 8 на рис. 4 показаны гайка и манжета соответственно.

Для замены пильной цепи необходимо открыть перепускной клапан 4 и при воздействии шины через тягу переместить шток с манжетой в исходное положение, вытесняя масло в бак (не показан) для ослабления цепи. При замене цепи свободный ход до усилия монтажного натяжения выбирается регулировочным винтом.

Однако представленная конструкция не позволяет осуществлять передвижение пильной шины в зажатом состоянии, что необходимо в процессе автоматического натяжения цепи. Поэтому предлагается 2 возможных варианта подвижной пильной шины. В первом случае 4 направляющие в виде шариков устанавливаются в корпусе и крышке (рис. 5, а), во втором случае – непосредственно в пильной шине (рис. 5, б).

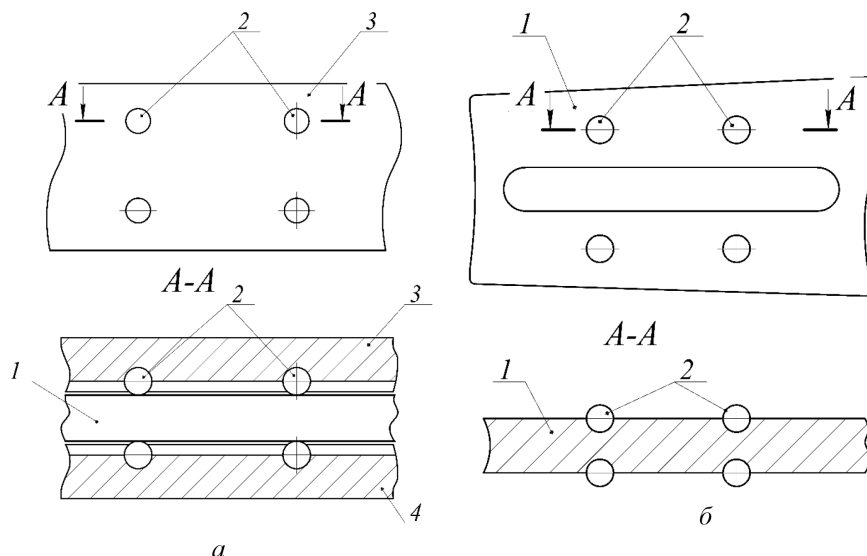


Рис. 5. Конструкции подвижной пильной шины с вставленными направляющими шариками: *a* – в корпусе и крышке; *б* – в пильной шине (*1* – шина; *2* – направляющие шарики; *3* – корпус; *4* – крышка)

Fig. 5. Designs of movable saw bar with inserted guide balls: *a* – in the body and cover; *б* – in the saw bar (*1* – bar; *2* – guide balls; *3* – body; *4* – cover)

Представленная конструкция устройства автоматического натяжения пильной цепи при закрепленной пильной шине, имеющей направляющие шарики, способствующие ее свободному перемещению, обеспечит возможность цепи постоянно находиться в натянутом положении, а следовательно, уменьшит вероятность ее спадания, ликвидирует расшатывание пильной шины и снизит износ деталей пильного аппарата.

#### Выводы

1. Разработанное конструктивное решение совершенствования пильного аппарата, обеспечивающее автоматическое натяжение пильной цепи при работе бензопилы, даст возможность снизить вероятность спадания пильной цепи и будет способствовать уменьшению износа элементов пильного аппарата.

2. При работе пильного аппарата с устройством для автоматического натяжения пильной цепи за счет снижения вероятности соскакивания цепи повышается безопасность работы и уменьшается риск ранения оператора при выполнении производственной операции.

3. Экономический эффект при использовании описанной конструкции достигается за счет увеличения срока службы цепного пильного аппарата. Также растет коэффициент использования моторного инструмента на чистом пилении, что ведет к повышению производительности работ.

4. Проведено теоретическое обоснование возможности применения предлагаемой конструкции на ряде серийно выпускаемых пил. Для ее практической реализации необходима заинтересованность производителей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 595152 СССР, МПК В27В 17/00. Рабочий орган переносной моторной пилы: № 2422195/29-15: заявл. 23.11.1976: опубл. 28.02.1978 / В.С. Жаденов, А.Н. Заикин, Ю.С. Харитонов.  
Zhadenov V.S., Zaikin A.N., Kharitonov Yu.S. *Portable Power Saw Working Member*. Certificate of Authorship USSR, no. SU 595152 A1, 1978. (In Russ.).
2. Галактионов О.Н., Гаспарян Г.Д., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Куницкая О.А., Лапшин С.О., Перский С.Н., Суханов Ю.В., Сыромаха С.М., Шегельман И.Р. Бензиномоторные пилы. Устройство и эксплуатация / под ред. И.В. Григорьева. СПб.: Изд.-полигр. ассоц. вузов, 2017. 206 с.  
Galaktionov O.N., Gasparyan G.D., Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Kunitskaya O.A., Lapshin S.O., Perskiy S.N., Sukhanov Yu.V., Syromakha S.M., Shegelman I.R. *Petrol-Driven Power Saws. Design and Operation*. Ed. by I.V. Grigorev. Saint Petersburg, Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vuzov Publ., 2017. 206 p. (In Russ.).
3. Заикин А.Н., Коньшакова С.А., Сиваков В.В., Кузнецов С.Г., Булхов Н.А. Технологический ресурс лесозаготовительной техники лесхозов Республики Башкортостан // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 123–133.  
Zaikin A.N., Konshakova S.A., Sivakov V.V., Kuznetsov S.G., Bulkhov N.A. Technological Resources of Harvesting and Logging Machinery of Bashkortostan Forestries. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 4, pp. 123–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-123-133>
4. Заикин А.Н., Торопов А.С., Меркелов В.М., Сиваков В.В. Повышение эффективности работы машин и оборудования при заготовке древесины в лесах с радиоактивным загрязнением // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 113–127.  
Zaikin A.N., Toropov A.S., Merkelov V.M., Sivakov V.V. Operating Efficiency Improvement of Machinery and Equipment While Logging in Forests with Radioactive Contamination. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 1, pp. 113–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-1-113-127>
5. Заикин А.Н., Шевелева Е.В., Сиваков В.В. Повышение надежности цепных пильных аппаратов лесозаготовительного оборудования // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 54. С. 261–263.  
Zaikin A.N., Sheveleva E.V., Sivakov V.V. Improving the Reliability Chain Saw Machines Forestry Equipment. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2019, no. 54, pp. 261–263. (In Russ.).
6. Памфилов Е.А., Заикин А.Н., Кривченкова Г.Н., Пилушина Г.А. Основные закономерности нагружения деталей пильных аппаратов лесозаготовительной техники // Изв. вузов. Лесн. журн. 2011. № 2. С. 82–88.  
Pamfilov E.A., Zaikin A.N., Krivchenkova G.N., Pilyushina G.A. Basic Regularities for Loading Details of Sawing Devices of Logging Machinery. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2011, no. 2, pp. 82–88. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/17f/0qeu1.pdf>
7. Памфилов Е.А., Пилушина 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. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/716/le1.pdf>
8. 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. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.89>

9. Патент 2153978 С1 РФ, МПК В27В 17/14, В27В 17/00. Устройство для натяжения пильной цепи режущего аппарата моторной пилы: № 99107189/13: заявл. 05.04.1999; опубл. 10.08.2000 / Д.К. Шмаков, С.В. Дмитриев, М.А. Федоринин.

Shmakov D.K., Dmitriev S.V., Fedorinin M.A. *Device for Tightening of Saw Chain of Motor Saw Cutting Chain Apparatus*. Patent RF, no. RU 2 153 978 C1, 2000. (In Russ.).

10. Патент 2453423 С2 РФ, МПК В27В 17/14. Цепная пила, оборудованная устройством для регулирования натяжения пильной цепи: № 2009135791/13: заявл. 25.02.2008; опубл. 20.06.2012 / Р. Пелленк.

Pellenk R. *Saw Chain with Tensioner*. Patent RF, no. RU 2 453 423 C2, 2012. (In Russ.).

11. Патент 2482961 С1 РФ, МПК В27В 17/14. Цепная пила: № 2011152002/13: заявл. 06.04.2010; опубл. 27.05.2013 / К. Окоути.

Okouti K. *Chain Saw*. Patent RF, no. RU 2 482 961 C1, 2013. (In Russ.).

12. Патент 2709386 С1 РФ, МПК В27В 17/14, А01G 23/091. Цепная пила и способ управления перемещениями направляющей шины этой пилы: № 2018112434: заявл. 28.09.2016; опубл. 17.12.2019 / Т. Кохио, М. Хуттунен, Т. Каатрасало, М. Гарсия.

Kokhio T., Khuttunen M., Kaatrasalo T., Garsiya M. *Chain Saw and Method of Controlling Movement of Guide Bar of the Saw*. Patent RF, no. RU 2 709 386 C1, 2019. (In Russ.).

13. Патент 2706190 С1 РФ, МПК В27В 17/00. Рабочий орган переносной моторной пилы: № 2018124099: заявл. 02.07.2018; опубл. 14.11.2019 / А.Н. Заикин, Е.В. Шевелева, В.В. Сиваков.

Zaikin A.N., Sheveleva E.V., Sivakov V.V. *Operating Unit of Portable Motor Saw*. Patent RF, no. RU 2 706 190 C1, 2019. (In Russ.).

14. Пошарников Ф.В., Кутыщев Д.С. Перспективы применения бензиномоторного инструмента на лесозаготовках. Воронеж, 2003. 52 с.

Posharnikov F.V., Kutischev D.S. *Prospects for the Use of Gasoline-Motor Tools in Logging*. Voronezh, 2003. 52 p. (In Russ.).

15. Cheța M., Marcu M.V., Borz S.A. Workload, Exposure to Noise, and Risk of Musculoskeletal Disorders: A Case Study of Motor-Manual Tree Felling and Processing in Poplar Clear Cuts. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 6, art. 300. <https://doi.org/10.3390/f9060300>

16. Gerasimov Yu., Seliverstov A., Syunev V. Industrial Round-Wood Damage and Operational Efficiency Losses Associated with the Maintenance of a Single-Grip Harvester Head Model: A Case Study in Russia. *Forests*, 2012, vol. 3, iss. 4, pp. 864–880. <https://doi.org/10.3390/f3040864>

17. Jourgholami M., Majnounian B., Zargham N. Performance, Capability and Costs of Motor-Manual Tree Felling in Hyrcanian Hardwood Forest. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2013, vol. 34, iss. 2, pp. 283–293.

18. Karjalainen T., Zimmer B., Berg S., Welling J., Schwaiger H., Finér L., Cortijo P. *Energy, Carbon and Other Material Flows in the Life Cycle Assessment of Forestry and Forest Products*. Joensuu, Finland, European Forest Institute, 2001. 68 p.

19. Kim S., Nussbaum M.A., Schoenfisch A.L., Barrett S.M., Chad Bolding M., Dickerson D.E. Occupational Safety and Health Concerns in Logging: A Cross-Sectional Assessment in Virginia. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 11, art. 440. <https://doi.org/10.3390/f8110440>

20. Koutsianitis D., Tsiaras P.A. Time Consumption and Production Costs of Two Small-Scale Wood Harvesting Systems in Northern Greece. *Small-Scale Forestry*, 2017, vol. 16, pp. 19–35. <https://doi.org/10.1007/s11842-016-9340-3>

21. Liepiņš K., Lazdiņš A., Liepiņš J., Prindulis U. Productivity and Cost-Effectiveness of Mechanized and Motor-Manual Harvesting of Grey Alder (*Alnus incana* (L.) Moench):

A Case Study in Latvia. *Small-Scale Forestry*, 2015, vol. 14, pp. 493–506. <https://doi.org/10.1007/s11842-015-9302-1>

22. Maciak A., Kubuška M., Moskalik T. Instantaneous Cutting Force Variability in Chainsaws. *Forests*, 2018, vol. 9, iss. 10, art. 660. <https://doi.org/10.3390/f9100660>

23. Marenče J., Mihelič M., Poje A. Influence of Chain Filing, Tree Species and Chain Type on Cross Cutting Efficiency and Health Risk. *Forests*, 2017, vol. 8, iss. 12, art. 464. <https://doi.org/10.3390/f8120464>

24. Montorselli N.B., Lombardini C., Magagnotti N., Marchi E., Neri F., Picchi G., Spinelli R. Relating Safety, Productivity and Company Type for Motor-Manual Logging Operations in the Italian Alps. *Accident Analysis & Prevention*, 2010, vol. 42, iss. 6, pp. 2013–2017. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.06.011>

25. Spinelli R., Magagnotti N., Nati C. Options for the Mechanized Processing of Hardwood Trees in Mediterranean Forests. *International Journal of Forest Engineering*, 2009, vol. 20, iss. 1, pp. 39–44. <https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702574>

26. Vusić D., Šušnjar M., Marchi E., Spina R., Zečić Ž., Picchio R. Skidding Operations in Thinning and Shelterwood Cut of Mixed Stands – Work Productivity, Energy Inputs and Emissions. *Ecological Engineering*, 2013, vol. 61, part A, pp. 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.09.052>

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

Научная статья

УДК 624.21.011

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-126-152

## Особенности проектирования деревянных мостов автомобильных лесовозных дорог

**В.А. Уткин, д-р техн. наук, доц.;** *ResearcherID:* [AAC-8400-2022](https://orcid.org/0000-0002-2044-3242),

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-2044-3242>

**С.А. Матвеев<sup>✉</sup>, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID:* [Y-3137-2018](https://orcid.org/0000-0001-7362-0399),

*ORCID:* <http://orcid.org/0000-0001-7362-0399>

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, просп. Мира, д. 5,  
г. Омск, Россия, 644080; prof.utkin@mail.ru, dfsibadi@mail.ru<sup>✉</sup>

*Поступила в редакцию 14.01.22 / Одобрена после рецензирования 10.04.22 / Принята к печати 13.04.22*

**Аннотация.** Обеспечение народного хозяйства лесосырьевыми ресурсами непосредственно связано с транспортной доступностью, с состоянием и развитием дорожной сети богатых лесом территорий. При этом потребность в строительстве новых лесных дорог круглогодичного действия составляет 2,1 тыс. км и сезонного действия – 9,3 тыс. км в год. Положение осложняется переводом транспортных сооружений на новые, более тяжелые временные нагрузки. Ранее используемые конструктивные формы транспортных сооружений устарели и требуют новых технических решений. Особенно это касается конструкций деревянных мостов, имеющих первостепенное значение для строителей лесных дорог. Предмет исследования – балочные пролетные строения деревянных мостов пролетами 12–18 м, подвергающиеся повышенным по сравнению с прежними автомобильным нагрузкам. Цель – разработка современных конструкций балочных пролетных строений из древесины на основе составных прогонов из бревен, дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков и клееных блоков заводского изготовления. Рассмотрены: пролетные строения с объединенными гребенчатыми нагельными соединениями составными прогонами из бревен, методика расчета пролетных строений с составными прогонами, конструкция опытного пролетного строения длиной 15 м, содержащего составные бревенчатые прогоны в совместной работе с железобетонной плитой проезжей части; новые конструкции пролетных строений длиной 15–21 м с дощато-брусчато-нагельно-гвоздевыми блоками под временные нагрузки А11 и НК-80, методика проектирования и технология изготовления блоков, примеры запроектированных и построенных мостов с пролетными строениями длиной 15 м; конструкции многоребристых пролетных строений из объединяемых при монтаже транспортабельных цельноклееных секций заводского изготовления, содержащих клееные балки и многослойную клееную деревоплиту. Предлагаемые конструкции с составными прогонами из бревен (брусев) и дощато-гвоздевыми блоками возможно изготовить на участках и полигонах лесозаготовительных организаций с использованием повсеместно применяемого оборудования, местных квалифицированных кадров и материала. Стоимостные показатели построенных в Омской области капитальных мостов на базе этих конструкций в 1,5–2 раза ниже показателей аналогов из железобетона. Применение данных конструкций будет эффективно при пионерном способе освоения лесных массивов. Использование клееных пролетных строений связано с современным этапом развития лесной инфраструктуры.



**Ключевые слова:** лесовозные лесные дороги, постоянные деревянные мосты, временные автомобильные нагрузки, составные прогоны из бревен, дощато-гвоздевые блоки, конструкция гребенчато-нагельного соединения, брусчатая деревоплита, клееная древесина, плитно-ребристые мосты, деревоплита из перекрестных досок

**Для цитирования:** Уткин В.А., Матвеев С.А. Особенности проектирования деревянных мостов автомобильных лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 126–152. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-126-152>

Original article

## Features of Designing Wooden Bridges of the Forest Complex

*Vladimir A. Utkin, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AAC-8400-2022](https://orcid.org/0000-0002-2044-3242), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2044-3242>

*Sergey A. Matveev*<sup>✉</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Y-3137-2018](https://orcid.org/0000-0001-7362-0399),

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7362-0399>

Siberian State Automobile and Highway University, prosp. Mira, 5, Omsk, 644080, Russian Federation; [prof.utkin@mail.ru](mailto:prof.utkin@mail.ru), [dfsibadi@mail.ru](mailto:dfsibadi@mail.ru)<sup>✉</sup>

Received on January 14, 2021 / Approved after reviewing on April 10, 2022 / Accepted on April 13, 2022

**Abstract.** The supply of the national economy with forest resources is directly related to transport accessibility, the condition and development of the road network of forest-rich territories. Construction requirements for year-round and seasonal new forest roads are 2.1 and 9.3 ths km per year, respectively. The situation is complicated by the transfer of transport facilities to new heavier live loads. The previously used design shapes of transport structures are outdated and require new engineering solutions. This is especially relevant for wooden bridge structures, which are of primary importance to forest road builders. The research subject is the wooden bridge girder superstructures with spans of 12–18 m undergoing increased road loads compared to the previous ones. The research aims is the development of modern designs of wooden beam superstructures based on the composite girders made of logs, board-bar-dowel-nail blocks and factory-made laminated blocks. The research includes: superstructures with composite girders of logs combined by comb-dowel joints, a method for calculating superstructures with composite girders, design of a 15-meter experimental superstructure containing composite log girders in joint operation with roadway reinforced concrete slab; new designs of 15–21-meter superstructures with board-bar-dowel-nail blocks A11 and NK-80 for live loads, design procedure and technology of block manufacturing, examples of designed and built bridges with the 15-meter superstructures; designs of multi-ribbed superstructures made of prefabricated transportable one-piece laminated sections containing laminated beams and a multilayer laminated timber slab. The proposed designs with composite girders of logs (beams) and board-nail blocks can be manufactured on the sites and yards of logging organizations using commonly used equipment, local qualified staff and materials. The cost parameters of permanent bridges built in the Omsk region with the use of these designs are 1.5–2 times lower than those of reinforced concrete analogues. The use of these designs will be effective in the pilot method of forestry development. The use of laminated superstructures is related to the modern phase of forest infrastructure development.



**Keywords:** logging forest roads, permanent wooden bridges, temporary vehicle loads, composite girders of logs, board-nail blocks, comb-dowel joint design, timber bar slab, laminated wood, slab-ribbed bridges, timber slab from cross planks

**For citation:** Utkin V.A., Matveev S.A. Features of Designing Wooden Bridges of the Forest Complex. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 126–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-126-152>

### Введение

Вклад лесного комплекса в экономику России существенно ниже аналогичного показателя других стран, схожих с нашей по объемам запасов и заготовки древесины. В этой связи Правительством разработана и одобрена Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 г., в результате реализации которой к указанному году ожидаются увеличение вклада лесного комплекса в валовый внутренний продукт, рост численности персонала, занятого в лесном комплексе, и налоговых поступлений.

Самым большим источником доходов для бюджета пока остается использование лесов для заготовки древесины. При этом увеличение освоения лесов ограничено транспортной доступностью лесных ресурсов и их удаленностью от железнодорожных и других транспортных путей. Для обеспечения уже достигнутого объема заготовки древесины годовая потребность в новом строительстве лесных дорог составит свыше 2,1 тыс. км автомобильных дорог постоянного круглогодочного действия и свыше 9,3 тыс. км автомобильных дорог сезонного действия.

Проектирование и строительство лесных дорог в настоящее время регламентируются сводом правил СП 288.1325800.2016, согласно которому лесные дороги по назначению подразделяются на лесовозные и лесохозяйственные. Лесовозные лесные дороги предназначены для вывозки древесины с мест заготовки, перемещения лесозаготовительной техники, технических грузов и доставки персонала к местам работы и обратно, а также для лесохозяйственных целей (охраны, защиты и воспроизводства лесов). По срокам действия различают постоянные и временные лесовозные лесные дороги. Первые входят в число объектов капитального строительства и подразделяются на грузосборочные (лесовозные магистрали), лесовозные ветки – ответвления от лесовозной магистрали, и лесовозные усы – ответвления от лесовозных веток. Вторые не являются объектами капитального строительства, создаются без разработки проекта и бывают летнего и зимнего действия (зимники). Лесохозяйственные лесные дороги предназначены для доставки людей, лесохозяйственной и специальной техники, грузов к местам производства работ, месту лесного пожара и для патрулирования лесных массивов. Такие дороги строят в защитных и резервных лесах и не используют для вывозки древесины.

На лесных дорогах, предназначенных для вывозки заготовленной древесины, основным транспортным средством являются лесовозные автопоезда, обеспечивающие до 80 % интенсивности движения. Приведенные в СП 288.1325800.2016 характеристики транспортных средств для вывозки лесных и технических грузов показывают, что масса отдельных специализированных автопоездов, применяемых на лесных дорогах, достигает 8–110 т при осевой нагрузке 15–19 т, что сопоставимо с временной автомобильной

нагрузкой АК и НК класса 14 для капитальных автодорожных мостов по СП 35.13330.2011 и превышает нормативную временную нагрузку класса 11 для деревянных мостов. Независимо от предназначения определенных категорий лесных дорог для перевозки грузов указанными транспортными средствами, в СП 288.1325800.2016 обозначено, что водопропускные искусственные сооружения на лесных автомобильных дорогах следует проектировать в соответствии с СП 35.13330.2011, а в случае необходимости пропуска нагрузки, превышающей указанные А11 и Н11, – выполнить расчет конструкций с учетом данной конкретной нагрузки–либо предусмотреть мероприятия по снижению воздействия этой нагрузки на сооружение до нормативного уровня. Правилами предусматривается проектирование и строительство капитальных железобетонных мостов на капитальных лесных дорогах под нагрузки А14 и Н14, а капитальных деревянных мостов – под нагрузки и А11 и Н11.

В современной практике проектирование и строительство автодорожных деревянных мостов в стране не распространено. Предпочтение отдается более дорогим капитальным (стальным, сталежелезобетонным, железобетонным) сооружениям. Вместе с тем невозможно представить современную лесовозную дорогу с ответвлениями и усами на лесном участке, где проезд тяжелого автопоезда не допускается из-за недостаточной грузоподъемности построенных на ней деревянных мостов. Малая грузоподъемность мостов становится очень серьезным ограничением в организации заготовительных работ. Очевидно, требования ко всем мостовым сооружениям на лесовозных дорогах по нагрузкам должны быть одинаковыми без исключений.

История отечественного мостостроения свидетельствует о выдающихся примерах возведения деревянных сооружений. В дореволюционной России многие несущие деревянные конструкции, включая мосты, строились преимущественно из бревен и брусьев в виде балочных, подкосных и шпренгельных систем, а также в виде арок из брусьев и досок. Большим вкладом в развитие деревянных конструкций был, например, проект И.П. Кулибина – мост через Неву и его модель в 1/10 натуральной величины, выполненные в 1776 г.

В 50–60 гг. XIX столетия в США, Западной Европе и России было построено большое число мостов с многорешетчатыми дощатыми фермами Тауна, применявшимися в железнодорожных мостах до Первой мировой войны. Дощато-нагельные фермы системы российского инженера К.Е. Лембке получили распространение во время Первой мировой войны и широко использовались при восстановлении, реконструкции железных и автомобильных дорог после Гражданской войны 1918–1922 гг.

Начиная с 1935 г. пролетные строения с фермами Лембке стали применять уже с гвоздевыми соединениями. В 1933 г., например, был построен Даниловский мост через р. Москву под трамвайную и автомобильную нагрузки с одноконсольными фермами Лембке пролетом 49,4 м, консолями по 14,3 м и подвесным пролетом 20,8 м.

Накопленный опыт строительства деревянных мостов позволил выполнить и решить все задачи строительства военных дорог, мостов и переправ в годы Великой Отечественной войны и в период восстановления народного хозяйства СССР. В результате в 1960 г. на автодорогах Советского Союза из общего количества мостов 92 % были деревянными, построенными по нормам военного времени.

В дальнейшем основой государственной технической политики в области строительства, в том числе транспортного, стало повсеместное внедрение сборного железобетона. Был отдан бескомпромиссный приоритет сборному железобетону в ущерб всем другим материалам, конструкциям и технологиям. Деревянные мосты на автомобильных дорогах федерального значения заменены железобетонными или стальными. Доля деревянных мостов постоянно снижается до настоящего времени.

Сегодня накопленный опыт проектирования и строительства деревянных, комбинированных (с использованием деревянных конструкций) мостов оказывается практически неиспользуемым и утрачивается, хотя последние разработки Союздорпроекта на основе дощато-гвоздевых ферм позволяли перекрывать пролеты 9, 12 и 18 м при новых, повышенных, нагрузках. В проекте Ленинградского филиала Гипродорнии в те же годы были разработаны конструкции балочных пролетных строений из клееной древесины для широкого диапазона временных нагрузок, длин пролетов и габаритов. Проект обладал высокой степенью унификации, когда пролетные строения разных габаритов для разных нагрузок отличались между собой только количеством балок в поперечнике и расстояниями между ними. В частности, клееные балки прямоугольного поперечного сечения 4 типоразмеров, разные по высоте, обеспечивали решение 42 вариантов пролетных строений длиной от 6 до 18 м, с габаритами от Г-7 до Г-10 под все виды временных нагрузок. Однако указанные серии проектов не получили дальнейшего развития. Со временем разработанные типовые проекты деревянных мостов устарели и стали непригодными для современных условий и требований. В настоящее время складывается такая ситуация, что деревянное мостостроение будто не существует, а новые своды правил допускают применение деревянных мостов только на автомобильных дорогах ниже III категории.

Проблемы развития лесного комплекса требуют расширения объема лесозаготовок, а вместе с ним строительства лесных дорог и лесной инфраструктуры современного уровня, в том числе на основе более широкого использования древесины в дорожном строительстве и мостостроении.

Возросшим требованиям пропуска нагрузок по деревянным мостам должны соответствовать новые конструктивно-технологические формы пролетных строений и опор, отвечающие одновременно требованиям по долговечности конструкции не менее 25 лет и индустриальности производства.

Выполненные на кафедре мостов Сибирского автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) научно-исследовательские и проектные разработки, опыт проектирования и строительства мостов в Омской области свидетельствуют о том, что использование таких конструктивно-технологических форм на практике возможно.

#### *Объекты и методы исследования*

*Пролетные строения с составными прогонами из бревен.* Известно, что возможности применения разбросных и сосредоточенных прогонов связаны с длиной и диаметром стандартных бревен-заготовок. Как правило, длина типовых пролетов не превышает стандартные 7 м. Возможности применения составных бревенчатых прогонов связаны, кроме того, со способами объединения стандартных бревен по длине и высоте. В качестве соединительных элемен-

тов обычно использовали деревянные колодки из древесины твердых пород и стальные пластинчатые нагели. Устройство таких соединений требовало высокой точности исполнения и квалификации исполнителей. В результате применение составных (2–3-ярусных) прогонов [2] на пластинчатых нагелях и колодках позволило перекрывать пролеты длиной не более 8,5 м. Исключением стало опытное пролетное строение пролетом 9 м Киевского филиала Союздорпроекта 1967 г. из круглого леса с заготовкой по специальному заказу. Стыкование стандартных бревен по длине не нашло применения, а для пролетных строений длиной более 10 м стали рекомендовать дощато-гвоздевые конструкции.

Вместе с тем теоретические исследования А.Р. Ржаницына [17] указывали на возможность дальнейшего использования составных прогонов в балочных мостах. Проблема состояла в способах объединения бревен (брусьев) между собой. Из известных соединений нашли применение поперечные стыки бревен с 2–3-сторонними накладками из окантованных бревен (брусьев) на болтах, замененными впоследствии стальными накладками. Этот тип стыков использован авторами в составных прогонах для стыкования бревен по длине. Для объединения окантованных на 2 канта бревен (брусьев) по высоте впервые применены гребенчатые стальные шпонки [1], содержащие стальные накладки и жестко закрепленные в них сваркой цилиндрические, вклеиваемые в тело бревен глухие нагели (рис. 1). Соединение сопрягаемых составных бревен-заготовок, оборудованных гребенчатыми шпонками, производится посредством наложения сопрягаемых поверхностей бревен друг на друга, совмещения стальных накладок, установки стяжных болтов и сварки кромок накладок фланговыми швами.

Работа гребенчатых соединений в составном прогоне из бревен рассмотрена в соответствии с результатами отечественных исследований [3, 6, 7, 20–23] работы цилиндрических нагелей в швах объединения железобетонной плиты и клееных балок деревожелезобетонных пролетных строений и результатами испытаний подобных нагельных соединений, выполненных финскими исследователями [36]. Предположено, что влияние защемления глухих нагелей в железобетонной плите сопоставимо с защемлением их в стальной пластине [6, 18, 19, 28].

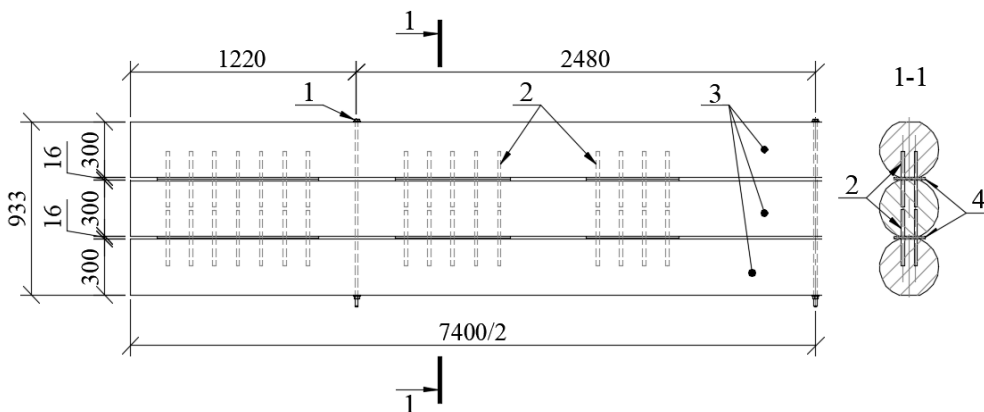


Рис. 1. Конструктивная схема составного прогона из бревен: 1 – стяжной болт; 2 – гребенчатая шпонка; 3 – бревна диаметром 32 см; 4 – сварной шов

Fig. 1. Structural scheme of a composite girder of logs: 1 – coupling bolt; 2 – comb dowel; 3 – logs,  $\varnothing$  32cm; 4 – weld

Согласно теории составных стержней [29], для данного случая составной прогон со связями сдвига (дискретно распределенными гребенчатыми соединениями) и поперечными стяжными болтами представляет собой внутренне статически неопределимую систему метода сил. В качестве основной системы принята система стержней (бревен), обозначенных осевыми линиями, а действия связей сдвига заменены неизвестными парными усилиями сдвига  $T_i$ , приложенными к концам консолей, заделанных условно на оси стержня (рис. 2).

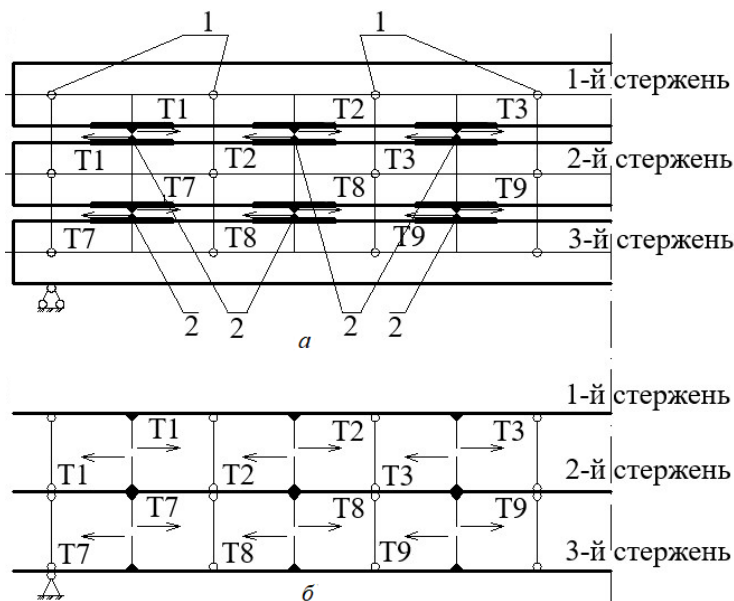


Рис. 2. Основная система составного прогона: *a* – в виде бревен с поперечными (1) и сосредоточенными (2) связями сдвига; *b* – в виде стержневой системы

Fig. 2. The basic system of a composite girder: *a* – as logs with transverse (1) and lumped (2) shear bonds; *b* – as a rod system

Система эквивалентности основной и заданной систем по методу сил представлена в матричной форме:

$$A\vec{T} + \Delta_F + \Delta_T = 0,$$

где  $A$  – матрица коэффициентов канонических уравнений;  $\vec{T}$  – вектор неизвестных усилий сдвига;  $\Delta_F$  – вектор грузовых перемещений;  $\Delta_T$  – предельно допустимый сдвиг.

Несмотря на жесткое соединение связей сдвига посредством сварки кромок стальных пластин, влияние податливости цилиндрических нагелей, защемленных в древесине гнезда нагеля, учтено величиной допускаемого сдвига  $\Delta_T = 0,1$  мм [6].

В общем случае метода сил коэффициенты канонических уравнений  $\delta_{ij}$  и свободные члены (грузовые перемещения)  $\Delta_{iF}$  системы уравнений определяются по известным формулам Мора с учетом деформаций растяжения (сжатия), сдвига и изгиба:



$$\begin{cases} \delta_{ij} = \int \frac{\bar{N}_i \bar{N}_j}{EA} ds + \int \frac{\bar{Q}_i \bar{Q}_j}{GA/k} ds + \int \frac{\bar{M}_i \bar{M}_j}{EI} ds; \\ \Delta_{iF} = \int \frac{\bar{N}_i N_F}{EA} ds + \int \frac{\bar{Q}_i Q_F}{GA/k} ds + \int \frac{\bar{M}_i M_F}{EI} ds, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{N}_i, \bar{N}_j, \bar{Q}_i, \bar{Q}_j, \bar{M}_i, \bar{M}_j$  – продольные и поперечные силы, изгибающие моменты в составном прогоне от безразмерных единичных сил  $X_i = 1$  и  $X_j = 1$  соответственно;  $EA, GA, EI$  – жесткости элементов прогонов на растяжение-сжатие, сдвиг и изгиб;  $k$  – коэффициент неравномерности распределения касательных напряжений по высоте поперечного сечения при сдвиге;  $N_F, Q_F, M_F$  – продольные и поперечные силы, изгибающие моменты в составном прогоне от действующей нагрузки.

Как известно, в расчетах рамных и балочных систем пренебрегают деформациями растяжения-сжатия, в расчетах шарнирных ферм допускается пренебрегать деформациями изгиба и сдвига. В данном случае при расчете составных прогонов [17] необходим учет влияния на распределение усилий и деформаций в составляющих прогон стержнях изгибающих моментов и продольных сил. Влиянием деформаций поперечного сдвига, составляющих 1 %, можно пренебречь.

В результате решения системы уравнений (1) полученные значения неизвестных усилий в связях сдвига  $T_i$  позволяют оценить напряженно-деформированное состояние составного прогона с учетом более точного перераспределения усилий между отдельными бревнами на участках между податливыми гребенчатыми соединениями. Напряженно-деформированное состояние изгиба массивного составного прогона будет представлено в виде напряженно-деформированного состояния системы совместно работающих сжато-изогнутых бревенчатых элементов (стержней).

В итоге могут быть построены эпюры расчетных изгибающих моментов и продольных сил в образующих составной прогон элементах-бревнах и определены соответствующие напряжения. На рис. 3 представлены расчетные эпюры для составного прогона пролетного строения длиной 7,5 м в конструкциях 8 прогонов моста через р. Ушайра (рис. 4, 5).

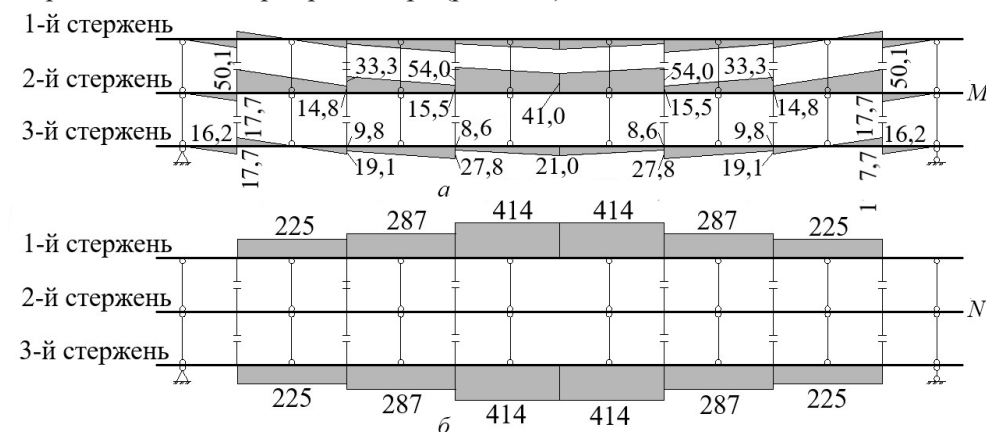


Рис. 3. Эпюры расчетных усилий в составном прогоне: а – изгибающие моменты,  $M$ , кНм; б – продольные силы,  $N$ , кН

Fig. 3. Diagrams of rated forces in a composite girder: а – bending moments, kNm ( $M$ ); б – longitudinal forces, kN ( $N$ )



Рис. 4. Пролетное строение моста через р. Ушайра с составными прогонами из бревен

Fig. 4. The Ushaira river bridge superstructure with composite girders of logs

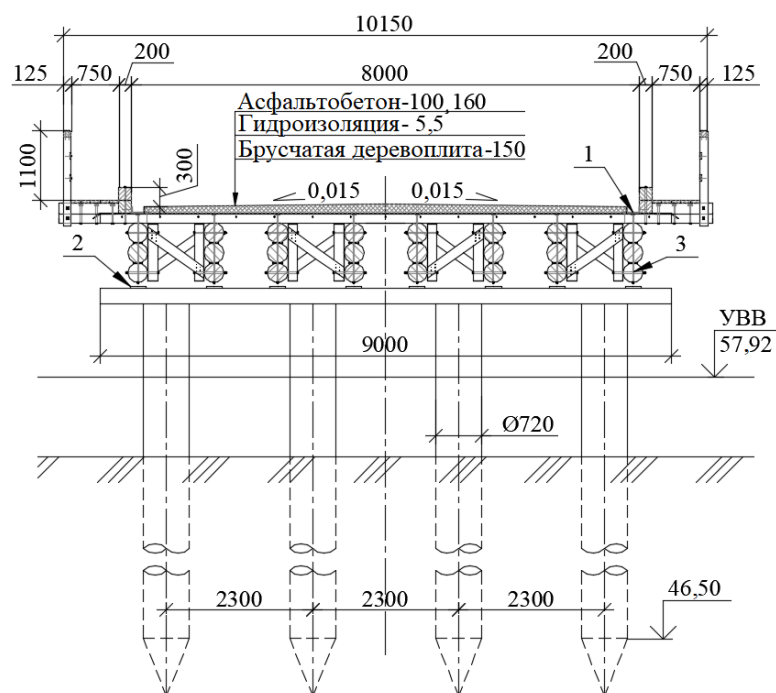


Рис. 5. Поперечное сечение моста через р. Ушайра: 1 – лоток Л-1; 2 – резино-металлическая опорная часть 250×150; 3 – составной прогон (УВВ – уровень высокой воды)

Fig. 5. The Ushaira river bridge cross-section: 1 – tray L-1; 2 – rubber-metal support part 250×150; 3 – composite girder (УВВ – high water level)

Разработанная методика расчета была использована в исследованиях конструкций с составными прогонами длиной 15 м [28].

Исходные данные пролетного строения: расчетный пролет – 14,4 м, габарит – Г10, временная нагрузка – А11 и Н11. Несущие прогоны составлены из 3 рядов 4-ярусных прогонов из окантованных бревен диаметром 32 см, объединенных посредством стяжных болтов и прокладок; причем поперечные стыки бревен выполнены со стальными накладками и болтами, а продольные в швах между бревен – с гребенчатыми соединениями.

Поперечное сечение пролетного строения составлено из 5 несущих прогонов и поперечной брусчатой деревоплиты с асфальтобетонным покрытием по изоляции из мостошлака (рис. 6).

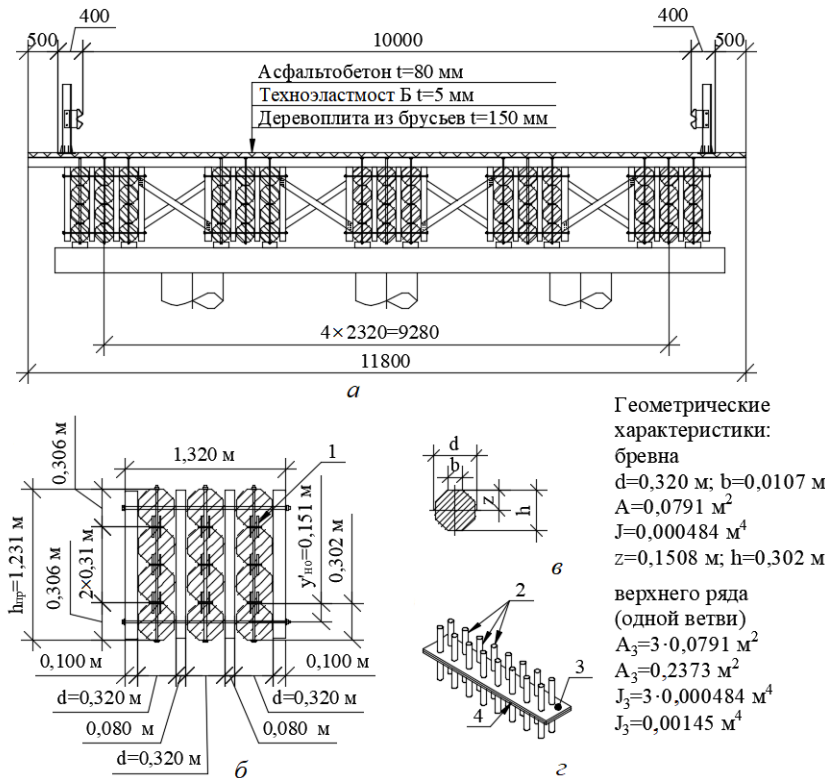


Рис. 6. Поперечное сечение пролетного строения длиной 15 м с брусчатой деревоплитой (а), составной прогон (б), геометрические характеристики бревна (в) и гребенчато-нагельное соединение (г): 1 – нагельное соединение; 2 – стальные нагели диаметром  $d = 16 \dots 20$  мм; 3 – стальные пластины  $d = 16 \dots 20$  мм; 4 – сварной шов ( $t$  – толщины слоев покрытия;  $h_{пр}$ ,  $b$ ,  $z$ ,  $y'_{но}$ ,  $J$  – геометрические параметры элементов сечения)

Fig. 6. Cross-section of a 15-meter superstructure with a timber bar slab (а) – composite girder, (б) – log geometric characteristics, (в) – comb-dowel joint (г) – 1 – dowel joint; 2 – steel dowels,  $\varnothing 16-20$  mm; 3 – steel plates,  $\varnothing 16-20$  mm; 4 – weld ( $t$  – thicknesses of cover layers;  $h_{пр}$ ,  $b$ ,  $z$ ,  $y'_{но}$ ,  $J$  – geometric parameters of section elements)

С целью оценки влияния на распределение усилий в составном прогоне изгибающих моментов и продольных сил единичные и грузовые перемещения системы канонических уравнений (1) были вычислены: а) с учетом влияния

только изгибающих моментов; б) при одновременном учете изгибающих моментов и продольных сил.

Оценка влияния такого взаимодействия дана в работе [28], где характер распределения нормальных напряжений в сечениях стержней прогона представлен в виде 2 диаграмм: с учетом влияния только деформаций от изгиба стержней и при одновременном учете изгибающих моментов и продольных сил. Причем в обоих случаях максимальные значения нормальных напряжений во всех расчетных сечениях не превышают расчетных сопротивлений ( $R_{ds} = 15,7$  МПа). Вместе с тем при учете влияния продольных сил отмечается более равномерное перераспределение напряжений между отдельными стержнями (бревнами) по высоте прогона без характерных для крайних фибр максимальных значений. В этом смысле целесообразность применения рассмотренных конструкций составных бревенчатых прогонов не вызывает сомнений.

Обращает на себя внимание массивность составных прогонов при пролете 15 м, толщине деревоплиты 15 см и расстоянии между прогонами 2,3 м. Очевидно, что распределяющая способность такой проезжей части недостаточна и существенно влияет на материалоемкость как прогонов, так и всей конструкции в целом. Для перекрытия русловых пролетов в условиях карчехода необходимо предусматривать пролеты длиной не менее 15 м. Возможности применения бревенчатых прогонов и железобетонной плиты проезжей части в одной конструкции при пролетах 15 м [10] были исследованы при строительстве опытного моста через р. Нягов на автомобильной дороге IV технической категории. При этом учтен опыт проектирования деревожелезобетонных мостов с клееными балками [7, 21, 22, 30–35, 37, 38]. В качестве несущих балок приняты 4-ярусные составные прогоны из бревен диаметром 30 см, в качестве соединительных элементов бревен – гребенчатые и нагельные соединения, для объединения монолитной железобетонной плиты с прогонами применены глухие цилиндрические нагели диаметром 16 мм. Конструкция пролетного строения приведена на рис. 7, процессы изготовления прогонов и плиты проезжей части показаны на рис. 8, 9.

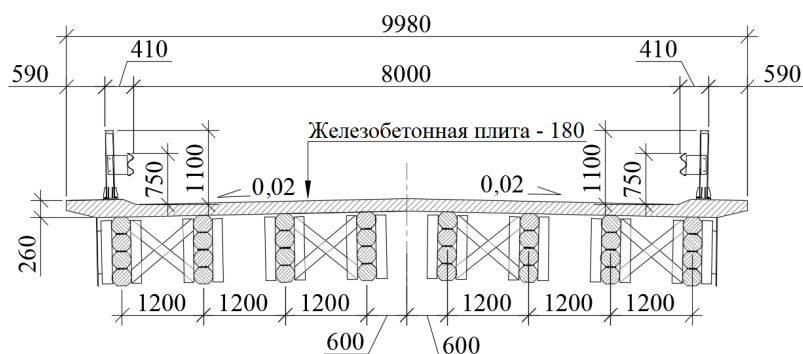


Рис. 7. Поперечное сечение пролетного строения моста, длиной 15 м с составными прогонами из бревен и монолитной железобетонной плитой, через р. Нягов

Fig. 7. Cross-section of a 15-meter superstructure with composite girders of logs and a reinforced concrete slab of the Nyagov river bridge





Рис. 8. Изготовление составных прогонов из бревен длиной 15 м  
Fig. 8. Manufacture of composite girders of 15-meter logs



Рис. 9. Изготовление железобетонной плиты проезжей части  
(опалубочные работы и устройство нагельных соединений)  
Fig. 9. Manufacture of a roadway reinforced concrete slab (formwork  
and installation of dowel joints)

Мосты с составными прогонами из бревен не требуют дорогих строительных материалов и оборудования и могут успешно возводиться с использованием местной рабочей силы.

*Дощато-гвоздевые пролетные строения.* Начало строительства мостов с многорешетчатыми дощатыми фермами Тауна в США отмечено 1820 г. Следом за США эти конструкции нашли применение в Европе и России. Было постро-

ено большое число мостов. Первые такие мосты в России возведены в 40-х гг. XIX в. Наибольшее распространение они получили во время Первой мировой войны. В дальнейшем, в процессе восстановления, реконструкции железных и автомобильных дорог после Гражданской войны, широко применялись дощато-нагельные фермы системы Лембке, а с появлением гвоздевых соединений в 1935 г. – пролетные строения с дощато-гвоздевными фермами, используемыми до настоящего времени. Ограниченность возможностей дощато-гвоздевых ферм при проектировании под возрастающие временные нагрузки и пролеты была связана с увеличением высоты ферм до  $1/6$  длины пролета, количества ферм в поперечном сечении, сечений поясов и нерациональным размещением досок поясов. Громоздкость и большая материалоемкость отличала эти фермы при проектировании под нагрузки А11 и НК-80. Все перечисленные недостатки обуславливались несовершенством дощатых многослойных и многоярусных поясов ферм.

В процессе совершенствования дощато-гвоздевых пролетных строений была предложена конструкция [8], составленная из коробчатых дощато-гвоздевых блоков, содержащих вертикальные перекрестные стенки из 2 слоев досок с брусчатыми поясами, усиленными горизонтальными плитами из 2 слоев перекрестных досок, и асфальтированной поперечной деревоплиты.

В период 2004–2005 гг. сотрудниками кафедры мостов СибАДИ по заданию управления дорожного хозяйства Омской области был запроектирован и испытан мост через р. Ушайра с дощато-гвоздевными пролетными строениями новой конструкции (рис. 4, 5, 10). После этого на муниципальных дорогах Омской области построено более 12 деревянных мостов с пролетными строениями длиной 15 м из дощато-гвоздевых блоков [29].

Опыт содержания и эксплуатации моста через р. Ушайра в течение 15 лет, результаты 2 испытаний моста временной нагрузкой позволили положительно оценить его состояние в условиях действующих нагрузок, выявить некоторые недостатки конструкции, подтвердить проектные характеристики и внести предложения по дальнейшему совершенствованию дощато-гвоздевых пролетных строений.

В результате исследований многослойных клееных плит из ортогонально-перекрестных слоев досок [26] были получены данные, свидетельствующие о повышенной несущей способности плит с ориентацией досок по главным направлениям. Это свойство было учтено при проектировании дощато-гвоздевых блоков по патенту на изобретение [13]. В результате вместо конструкции дощато-гвоздевого пролетного строения с 4 дощато-гвоздевными блоками получена конструкция, содержащая 3 блока с поясами, усиленными перекрестными слоями досок продольно-поперечной ориентации. При этом материалоемкость пролетного строения по древесине и металлу уменьшилась на 20 %. Аналогичный результат был получен при усилении брусчатых нижних поясов блоков дополнительным слоем брусьев сверху в середине пролета (рис. 11).

Проезжая часть построенных деревянных мостов с брусчатой деревоплитой, подуклонкой из пескоцемента и железобетонными плитами дорожного покрытия не обеспечивает качественную защиту деревоплиты от увлажнения, особенно в местах повреждения гидроизоляции, размещения колесоотбойного бруса и тротуаров, причем конструктивно защищенные от увлажнения дощато-гвоздевые блоки сохраняют свое первоначальное состояние.



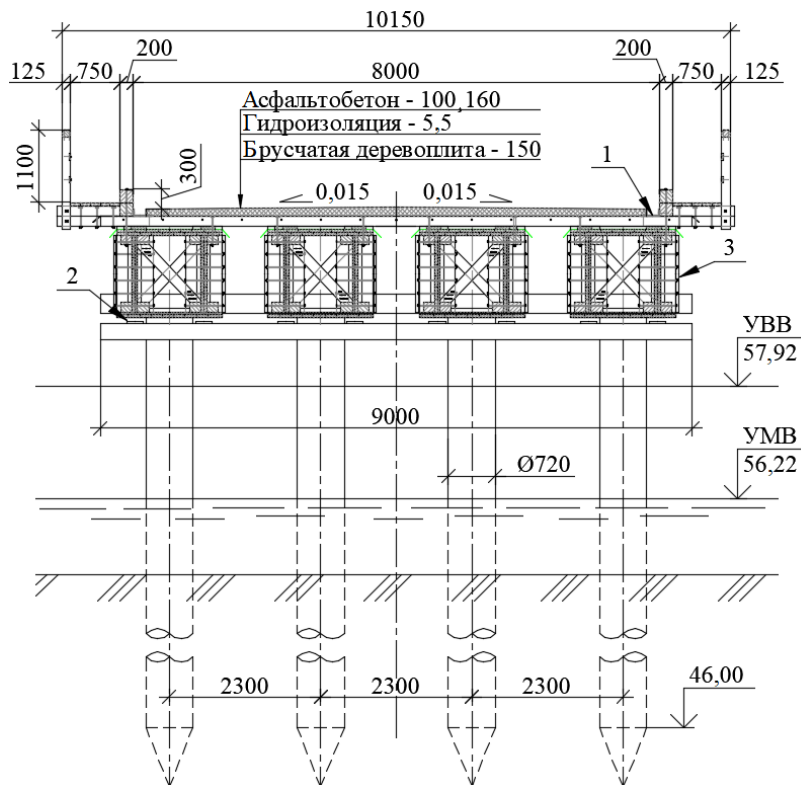


Рис. 10. Поперечное сечение дощато-гвоздевого пролетного строения моста через р. Ушайра: 1 – лоток Л-1; 2 – резино-металлическая опорная часть 250×150; 3 – дощато-гвоздевой блок (УМВ – уровень средней воды)

Fig. 10. Cross-section of a board-nail superstructure of the Ushaira river bridge: 1 – tray L-1; 2 – rubber-metal support part 250×150; 3 – board-nail block



Рис. 11. Мост через р. Оша с 3 дощато-гвоздевными блоками в сечении 15-метровых пролетных строений

Fig. 11. The Osha river bridge with 3 board-nail blocks in the cross-section of 15-meter superstructures

Нормативный срок службы 50 лет для мостов с пролетными строениями из дощато-гвоздевых блоков может быть достигнут за счет конструктивных приемов защиты моста от внешних воздействий со стороны опор и проезжей части. Нет сомнения в том, что у капитальных мостов с деревянными пролетными строениями опоры должны быть капитальными, без применения деревянных конструкций. Наилучшими решениями в современных условиях могут стать свайные опоры на железобетонных или трубчатых стальных сваях.

Конструкция [15] пролетного строения из 3 дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков с железобетонной плитой проезжей части (рис. 12) позволяет существенно улучшить защитные свойства и устранить отмеченные недостатки первоначальной конструкции (см. рис. 10, 11).

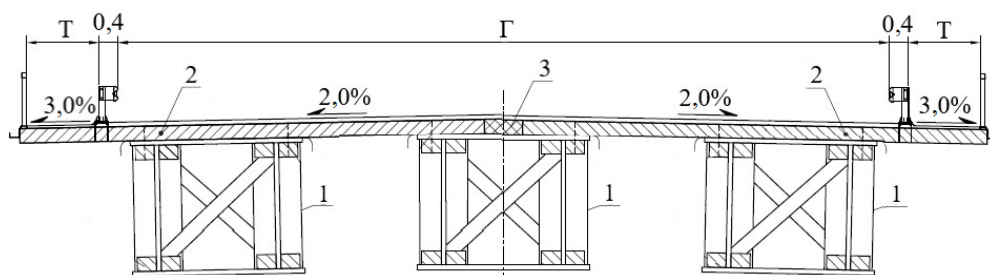


Рис. 12. Поперечное сечение дощато-гвоздевого пролетного строения со сборной железобетонной плитой проезжей части ( $\Gamma$  – габарит проезжей части;  $T$  – ширина тротуара)

Fig. 12. Cross-section of a board-nail superstructure with a precast roadway reinforced concrete slab ( $\Gamma$  – roadway size;  $T$  – sidewalk width)

Особенность этого решения состоит в том, что вместо поперечной древесной плиты из бруса и железобетонных дорожных плит покрытия проезжей части применена конструкция проезжей части из сборных железобетонных плит 2, уложенных поперек моста на несущие дощато-брусчато-нагельно-гвоздевые блоки 1 с объединением их между собой над средним блоком продольным швом из монолитного железобетона 3. Сформированная железобетонная плита покрыта гидроизоляцией и слоем асфальтобетона, оборудована мостовыми ограждениями, тротуарами и водоотводными устройствами.

Предложенная новая конструкция позволила существенно снизить материалоемкость пролетного строения в древесине, уменьшить трудозатраты и стоимость, увеличить защитные свойства пролетного строения. Все это в целом отвечает современным требованиям, связанным с обеспечением долговечности, надежности, повышением срока службы и капитальности мостов.

Дальнейшее совершенствование конструкции с несущими дощато-брусчато-нагельно-гвоздевными блоками связано с объединением железобетонной плиты проезжей части и дощато-гвоздевых блоков для совместной работы под воздействием постоянной и временной нагрузок. Опыт проектирования и строительства деревобетонных мостов с клееными балками и сталежелезобетонных мостов указывает на эффективность включения железобетонной плиты проезжей части в совместную работу с главными балками. Основным препятствием для конструктивного объединения железобетонной

плиты с дощато-гвоздевыми блоками было отсутствие способов и примеров таких соединений в случае сборных железобетонных плит.

Из работ [6, 7, 21] известны способы объединения монолитной железобетонной плиты путем обетонирования цилиндрических нагелей, установленных (вклеенных) в засверленные вертикальные отверстия клееных балок. Однако реализовать такое соединение ввиду насыщенности верхних брусчатых поясов дощато-гвоздевых блоков поперечными нагельными скреплениями практически невозможно.

Для объединения монолитной железобетонной плиты и верхних брусчатых поясов дощато-гвоздевых блоков было разработано устройство, содержащее гребенчатые парные стальные накладки 5, закрепляемые к брускам 7 поясов сквозными стальными болтами (нагельными) 4 для объединения поясов дощато-гвоздевых блоков со стенками (рис. 13, в). Входящие в монолитное тело железобетонной плиты 2 гребенчатые выступы 9 снабжены стержневыми упорами 10, обеспечивающими совместную работу железобетонной плиты и блоков. Отверстия и вырезы гребенчатых выступов предназначены для пропуска арматурных стержней железобетонной плиты.

В результате запатентована конструкция комбинированного дощато-брусчато-нагельно-гвоздевого пролетного строения моста с железобетонной плитой проезжей части [16], содержащая коробчатые несущие блоки 3 из древесины и монолитную железобетонную плиту проезжей части (рис. 13, а, б), объединенные для совместной работы гребенчатыми стальными накладками со стержневыми упорами 8 (рис. 13, в).

В отличие от конструкции на рис. 12 дощато-брусчато-нагельно-гвоздевые блоки изготовлены без 2-слойного усиления верхнего пояса перекрестными досками в виде открытого сверху корытного профиля. Устройство проезжей части 4 выполняется после установки блоков на опоры, работы над опалубкой днища 1 и изготовления железобетонной плиты проезжей части.

Проектное решение конструкции пролетного строения по патенту (рис. 14) рассмотрено в работе [25]. Запроектировано комбинированное деревожелезобетонное пролетное строение с расчетным пролетом 14,4 м для габарита проезжей части Г-8 + 2Т×0,7 м под временную нагрузку А14 и Н14. Пролетное строение содержит 3 дощато-гвоздевых блока высотой 1,48 м и железобетонную плиту толщиной 18 см, включенную в совместную работу с блоками на 2-й стадии от временной нагрузки (рис. 13).

Пролетное строение представлено в виде составной 2-опорной внутренней статически неопределимой балочной системы с неизвестными усилиями сдвига в местах размещения соединительных устройств. В результате решения системы уравнений метода сил получены значения неизвестных усилий сдвига  $T_1 = T_6 = 2056$  кН;  $T_2 = T_5 = 669$  кН;  $T_3 = T_4 = -433$  кН, позволяющие запроектировать конструкцию и размещение устройств объединения железобетонной плиты и деревянных блоков.

С учетом полученных значений неизвестных усилий сдвига определены расчетные значения продольных сил и изгибающих моментов в деревянной конструкции и продольных сил в железобетонной плите.

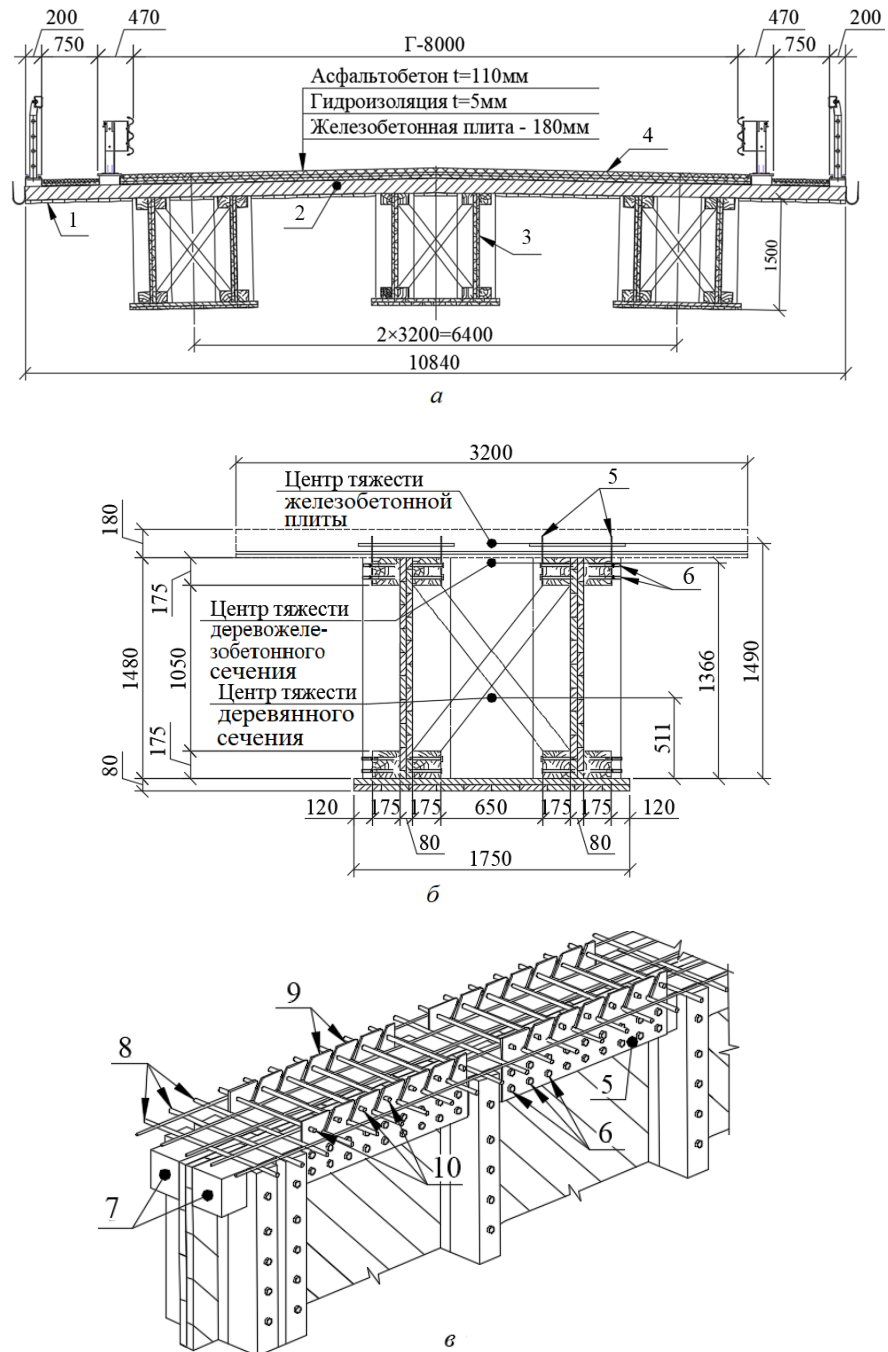


Рис. 13. Поперечное сечение дощато-гвоздевого пролетного строения с монолитной железобетонной плитой проезжей части: *a* – общий вид; *b* – конструкция отдельного блока; *в* – конструкция объединения дощато-гвоздевых блоков с железобетонной плитой

Fig. 13. Cross-section of a board-nail superstructure with a monolithic reinforced concrete slab of the roadway: *a* – general view; *b* – separate block design; *в* – design of the combination of board-nail blocks with a reinforced concrete slab

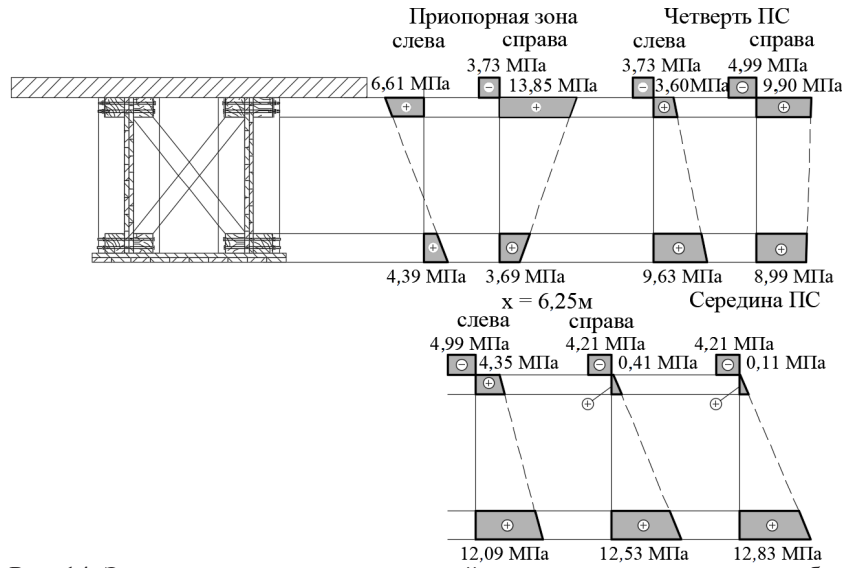


Рис. 14. Эпюры нормальных напряжений в характерных сечениях комбинированного пролетного строения с дощато-гвоздевыми блоками и железобетонной плитой проезжей части (ПС – пролетное строение)

Fig. 14. Diagrams of normal stresses in characteristic sections of a combined superstructure with board-nail blocks and a reinforced concrete slab of the roadway (ПС – superstructure)

На рис. 14 представлены эпюры нормальных напряжений в железобетонной плите и элементах деревянной конструкции в сечениях 1-1, 2-2, 3-3 и 4-4 по длине пролета. Как видно из эпюр, максимальные растягивающие напряжения в деревянных элементах не превышают расчетных сопротивлений, а сжимающие напряжения в железобетонных сечениях плиты заметно ниже расчетных. Причиной этого является необоснованно завышенная толщина железобетонной плиты, принятая в соответствии с требованиями для железобетонных мостов.

Представленные результаты исследования деревянных пролетных строений мостов на автомобильных дорогах в условиях современных автомобильных и колесных нагрузок, возросших требований к безопасности и долговечности свидетельствуют о возможности неограниченного применения таких строений на лесных дорогах с использованием дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых конструкций. Этому способствуют предложенные конструктивно технологические формы пролетных строений из пиломатериала.

*Пролетные строения с применением клееной древесины.* За последнее 30-летие в зарубежном мостостроении широкое применение получили клееные конструкции [5]. Увеличение производства клееных конструкций в США и распространение его в настоящее время в странах Европы объясняются тем, что приобретенный за последние годы опыт доказал экономичность клееной древесины по сравнению с металлическими и железобетонными конструкциями.

Зарубежный опыт заводского изготовления клееных конструкций в настоящее время внедряется на целом ряде предприятий лесного комплекса страны. При высоких технической оснащенности заводов и культуре производства возможно получение прочных и долговечных мостовых конструкций из клее-

ной древесины. Действующие в стране предприятия по изготовлению деревянных клееных конструкций (ДКК) ориентированы в основном на номенклатуру промышленно-гражданского строительства [4] (клееный брус, клееные балки, элементы ограждений и т. п.). Заказы от транспортных строителей практически отсутствуют. Возможности заводов ДКК для деревянного мостостроения не используются, хотя опыт применения клееных балок в Архангельской области, Республике Коми и других регионах в 70–80 гг. XX в. свидетельствует о большой заинтересованности страны в развитии и применении этих конструкций на дорогах лесной отрасли.

Как показало время, независимо от того, из какого материала построен мост, через 50 лет транспортные условия меняются и конструкции сооружений требуют модернизации. Поэтому экономически не всегда оправдываются затраты на строительство более капитального и дорогостоящего сооружения на том основании, что он будет служить более 50 лет.

Из опыта применения мостов с клееными балками в нашей стране установлено, что основными причинами преждевременного выхода из строя деревянных мостов стали не балки, а деревянные свайные и на свайном основании опоры, разрушаемые карчеходами и ледоходами, и деревянная проезжая часть. Известно, например, что клееные балки после разборки отслуживших свой срок мостов повторно использовались на строительстве временных мостов подъездных дорог и служили в составе их конструкции продолжительное время. Таким образом, увеличение срока службы деревянных мостов с клееными балками связано с модернизацией проезжей части и опор.

В США 50-летний срок службы мостов с клееными балками обеспечивался за счет конструктивных мероприятий. На начальном этапе для выполнения требований по защите древесины от гниения все элементы мостов, включая сваи, обстройку опор, балки, элементы проезжей части, подвергались обязательному антисептированию креозотом в автоклавах. В нашей стране этот способ защиты применялся в основном для шпал и мостовых брусьев железнодорожных мостов. Клееные балки автодорожных мостов подвергались поверхностному антисептированию.

На втором этапе применения клееных балок в мостовом строительстве в США широкое распространение получил метод устройства железобетонной плиты по антисептированной древоплите из вертикальных досок. В нашей стране предпочтение было отдано проезжей части из поперечных древоплит с асфальтобетонным покрытием. Однако эта конструкция показала себя недолговечной и была снята с производства. Взамен предложена конструкция древобетонных мостов с комбинированными пролетными строениями, содержащими клееные балки прямоугольного сечения в совместной работе с железобетонной плитой проезжей части. Начало положено трудами отечественных ученых Б.А. Глотова, В.И. Кулиша, И.Ю. Белуцкого [6, 7] и др. Разработаны типовые проекты, построено несколько мостов в Архангельской области и Хабаровском крае, но массово данная конструкция не применялась: сдерживала отсталая технология изготовления клееных балок. Состоянию, теории, исследованиям, проектированию древожелезобетонных мостов с клееными балками и железобетонной плитой посвящены известные работы В.П. Стукова [20–23]. Эти конструкции соответствуют всем требованиям, предъявляемым к современным мостам, и в условиях современного производства ДКК должны получить признание.



Длительная эксплуатация деревянных мостов, содержащих клееные элементы и конструкции, доказала полную надежность клеевых соединений.

В настоящее время усилия специалистов направлены на упрощение монтажа. В США и других западных странах наибольшее распространение получили конструкции, которые монтируются в короткие сроки из крупных сборных блоков, привозимых с завода на место работ. Особое место занимают ребристые и коробчатые балочные пролетные строения, собираемые из плит, балок, блоков и объединяемые в целое посредством поперечного обжатия усилиями напрягаемых стержней [24, 26, 27].

На кафедре мостов СибАДИ проведены исследования по применению цельноклееных пролетных строений на основе совместной работы клееных балок и многослойной деревоплиты из ортогональных слоев горизонтальных досок-заготовок [27], получены патенты на изобретения [9, 11, 12]. Наибольшее практическое значение имеет конструкция дощато-клееного пролетного строения моста заводского изготовления [14].

В отличие от зарубежных аналогов [31] предлагаемое пролетное строение (рис. 15) составлено из цельноперевозимых секций 1, содержащих клееные балки 2 и многослойную клееную деревоплиту 3, объединяемых при монтаже по смежным ребрам (балкам) 4 посредством склеивания и обжатия вертикальных ребер жесткости 6 высокопрочными стальными стержнями 5. Верхняя сторона деревоплиты, включая кромки 7, покрыта гидроизоляцией, а продольные швы 8 заполнены мастикой. На проезжей части укладывается асфальтобетон 9. Объединение секций производится обжатием клеевых швов между внешними ребрами жесткости продольных ребер посредством напрягаемых стальных стержней и образования сдвоенных ребер.

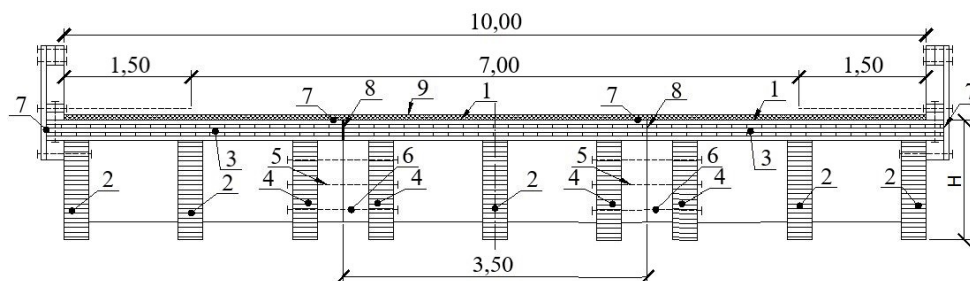


Рис. 15. Поперечное сечение сборного дощато-клееного пролетного строения заводского изготовления по патенту [14]

Fig. 15. Cross-section of a precast board-laminated superstructure prefabricated according to the patent [14]

Положительной стороной предлагаемого решения является применение вместо обжатой усилиями напрягаемых стержней деревоплиты проезжей части из досок «на ребро» многослойной перекрестной деревоплиты из досок, склеенных «по пласти» [27]. В этом исполнении деревоплита работает как единый композит с одинаковыми свойствами как в продольном, так и в поперечном направлении пролета. Нет опасности веерного раскрытия плиты в поперечном направлении при ослаблении усилий обжатия. Кроме того, необходимо отметить более высокие водозащитные свойства деревоплиты с горизонтальным размещением досок, когда все швы между досками перекрыты.

Конструкция пролетного строения из блоков заводского производства предусматривает возможность изготовления пролетных строений в условиях, обеспечивающих соблюдение требований, предъявляемых к режиму склеивания [5].

На мировом рынке деревянного домостроения наиболее перспективной, согласно Стратегии, технологией является технология сборки зданий из перекрестно-клеенных панелей. Предложенные авторами технические решения дощато-клееных пролетных строений, содержащих в своем составе многослойную деревоплиту из перекрестных досок, вписываются в область их практической реализации в условиях домостроительных предприятий. Это позволит существенно расширить область применения клееной древесины, используемой в мостостроении и на лесных дорогах в частности.

Другим направлением доступного применения ДКК в мостах на лесных дорогах лесного комплекса нашей страны является применение деревоклееных балок в совместной работе с железобетонной плитой проезжей части [20–22]. Эти конструкции соответствуют всем современным требованиям к мостам и по нагрузкам, и по долговечности. Для развития данного направления потребуются строительство всего лишь нескольких производственных предприятий по изготовлению клееных балок.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Результаты исследования пролетных строений с составными прогонами из бревен с гребенчатыми соединениями и брусчатой деревоплитой проезжей части позволили установить возможности их применения при современных автомобильных нагрузках для пролетов 7–8 м. Данные конструкции пролетных строений были внедрены в проектах для пойменных пролетов мостов на дорогах Омской области (см. рис. 4).

Возможности применения бревенчатых прогонов и железобетонной плиты проезжей части в совместной работе при пролетах 15 м были исследованы (рис. 16) при строительстве опытного моста через р. Нягов на автомобильной дороге IV технической категории. При всех схемах загрузки отмечено соответствие результатов экспериментального и теоретического исследований. Подтверждены проектные характеристики жесткости деревожелезобетонного пролетного строения с составными прогонами из бревен.



Рис. 16. Испытание моста через р. Нягов. Установка временной нагрузки

Fig. 16. The Nyagov river bridge testing. Installation of live load

Работа спаренного составного прогона и применяемых соединений была исследована испытанием статической нагрузкой на месте их изготовления и после установки на опоры (рис. 17). Замеренные при этом прогибы и деформации в характерных сечениях свидетельствовали о соответствии экспериментальных и теоретических значений.



Рис. 17. Испытание спаренного составного прогона статической нагрузкой (в пролете)

Fig. 17. Static load test of a coupled composite girder (in the span)

В итоге конструкции пролетных строений с составными прогонами из бревен могут быть использованы при строительстве деревянных мостов на современных лесных дорогах при действующих сейчас временных нагрузках: при пролетах до 8 м – с деревянной проезжей частью; при пролетах 15–18 м – с железобетонной плитой проезжей части из монолитного железобетона.

К числу положительных характеристик рассмотренных дощато-гвоздевых конструкций пролетных строений следует отнести:

возможность перекрывать пролеты длиной 12, 15, 18 м и более при действующих современных автомобильных нагрузках;

применение местных строительных материалов (круглого леса, окантованных бревен, бруса и досок) естественной сушки;

изготовление мостовых конструкций на полигонах (стройдворах) с использованием передвижного оборудования и местных рабочих кадров;

защиту изготовленных конструкций трудновываемыми антисептиками путем нанесения их на поверхность распылением или кистями;

низкую стоимость мостов с рассматриваемыми конструкциями (в 1,5 раза) в сравнении с рекомендуемыми для лесных дорог железобетонными мостами;

обеспечение срока службы не менее 15 лет.

В число недостатков этих конструкций входит подверженность атмосферным воздействиям деревянной проезжей части. Предложенные взамен комбинированные пролетные строения, включающие несущие коробчатые до-

щато-брусчато-нагельно-гвоздевые блоки (дощато-гвоздевые блоки) и железобетонную плиту проезжей части вместо брусчатой деревоплиты и дорожных плит покрытия (см. рис. 12), конструктивно защищены от атмосферных и биологических воздействий при одновременном снижении расхода древесины.

Наиболее эффективным деревобетонным пролетным строением может быть конструкция, в которой монолитная железобетонная плита проезжей части включена в совместную работу с несущими блоками. Как известно из опыта возведения деревобетонных мостов с клееными балками, этот прием существенно повышает защитные свойства несущей древесины и снижает их материалоемкость. Однако конструкция, объединяющая железобетонную плиту с клееными балками, не может быть использована для ее объединения с верхними брусчатыми поясами дощато-гвоздевых блоков ввиду их насыщенности горизонтальными нагельными и болтами. Предложенная (см. рис. 13) конструкция соединительных устройств дощато-гвоздевых блоков с железобетонной плитой проезжей части позволяет с наибольшим успехом применять деревобетонные пролетные строения на основе совместной работы железобетонной плиты и дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков. Можно с уверенностью утверждать о целесообразности их применения на лесных дорогах в нашей стране.

Что касается пролетных строений из клееной древесины, то следует отметить особенности их применения: клееные конструктивные элементы, детали необходимо изготавливать на специализированных предприятиях, в заводских условиях; действующие в настоящее время в РФ предприятия ДКК специализируются в основном на выпуске клееного бруса и клееных балок ограниченных типоразмеров, позволяющих использование продукции в пролетах до 12 м; развивающееся за рубежом производство клееных плит и панелей из перекрестных досок, необходимое для формирования плитно-ребристых систем пролетных строений мостов, в нашей стране пока отсутствует.

Таким образом, применение прогрессивных мостовых конструкций на основе клееной древесины сдерживается из-за отсутствия необходимой инфраструктуры по переработке древесины.

#### *Заключение*

Важнейшей из проблем обеспечения народного хозяйства лесосырьевыми ресурсами является проблема транспортной доступности территорий, богатых лесом. Потребность в строительстве новых лесных дорог круглогодичного действия составляет 2,1 тыс. км и 9,3 тыс. км в год сезонного действия. Положение осложняется в связи с переводом транспортных сооружений на новые, более тяжелые временные нагрузки. Предстоят серьезные изменения в области проектирования и строительства мостовых сооружений.

В нормативных документах по лесным дорогам главное место отведено так называемым постоянным деревянным мостам. Ранее применяемые в дорожном строительстве деревянные мосты не соответствуют современным нагрузкам, требованиям по долговечности и безопасности движения, сняты с производства и заменены капитальными (железобетонными, стальными, сталежелезобетонными), в исключительных случаях используются как временные.

На кафедре «Мосты и тоннели» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета разработаны новые конструкции пролетных

строений мостов из древесины на основе составных бревенчатых прогонов, дощато-гвоздевых коробчатых блоков и цельноперевозимых дощато-клееных блоков заводского изготовления. В содружестве с управлением дорожного хозяйства Омской области были запроектированы и построены ряд мостов с пролетами из бревен и дощато-гвоздевых блоков. Исследования напряженно-деформированного состояния построенных пролетных строений под воздействием автомобильных нагрузок показали соответствие экспериментальных и теоретических результатов.

Рассмотренные в данной статье конструкции пролетных строений из древесины могут быть с успехом внедрены на лесовозных дорогах. Научно-исследовательская лаборатория кафедры располагает возможностями проектирования описанных конструкций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 29938 U1 РФ, МПК E01D 2/0. Пролетное строение с составными прогонами из бревен: № 2002131869/20: заявл. 02.12.2002: опубл. 10.06.2003 / В.А. Уткин, В.И. Пузиков, М.Ю. Каретников.

Utkin V.A., Puzikov V.I., Karetnikov M.Yu. *Superstructure with Composite Girders Made of Logs*. Certificate of Authorship RF, no. RU 29938 U1, 2003. (In Russ.).

2. Гибшман Е.Е. Проектирование деревянных мостов. М.: Транспорт, 1976. 272 с. Gibshman E.E. *Designing of Wooden Bridges*. Moscow, Transport Publ., 1976. 272 p. (In Russ.).

3. Дмитриев П.А. Конструкции из дерева и пластмасс. Специальный курс. Автодорожные и пешеходные мосты. Оренбург: Газпромпечат, 2002. 192 с.

Dmitriev P.A. *Structures of Wood and Plastics. Special Course. Road and Pedestrian Bridges*. Orenburg, Gazprompechat' Publ., 2002. 192 p. (In Russ.).

4. Инструкция по изготовлению и контролю качества деревянных клееных конструкций для производственных сельскохозяйственных зданий. М.: Минсельхоз РФ, 2004. 78 с.

*Guidelines for the Manufacture and Quality Control of Wooden Laminated Structures for Industrial Agricultural Buildings*. Moscow, Minsel'khoz RF Publ., 2004. 78 p. (In Russ.).

5. Ковальчук Л.М. Производство деревянных клееных конструкций. М.: Стройматериалы, 2005. 336 с.

Koval'chuk L.M. *Production of Wooden Laminated Structures*. Moscow, Stroymaterialy Publ., 2005. 336 p. (In Russ.).

6. Кулиш В.И. Клееные деревянные мосты с железобетонной плитой. М.: Транспорт, 1979. 160 с.

Kulish V.I. *Laminated Wooden Bridges with Reinforced Concrete Slab*. Moscow, Transport Publ., 1979. 160 p. (In Russ.).

7. Кулиш В.И., Белуцкий И.Ю., Быков Б.С., Цуканов В.П. Опыт проектирования, строительства и эксплуатации клееных деревянных мостов с железобетонной плитой // Автомобильные дороги. 1982. № 10. С. 7–9.

Kulish V.I., Belutskiy I.Yu., Bykov B.S., Tsukanov V.P. Experience of Designing, Construction and Operation of Laminated Wooden Bridges with Reinforced Concrete Slab. *Avtomobil'nyye dorogi*, 1982, no. 10, pp. 7–9. (In Russ.).

8. Патент 2169812 C1 РФ, МПК E01D 2/04. Дощато-гвоздевое пролетное строение: № 99121132/03: заявл. 08.10.1999: опубл. 27.06.2001 / В.А. Уткин, В.И. Пузиков.

Puzikov V.I., Utkin V.A. *Nailed-Board Span*. Patent RF, no. RU 2 169 812 C1, 2001. (In Russ.).



9. Патент 2204644 С2 РФ, МПК E01D 2/00, E01D 2/04. Дощато-клееное пролетное строение: № 2001113605/03: заявл. 23.05.2001: опубл. 20.05.2003 / В.А. Уткин, В.И. Пузиков, П.Н. Кобзев.

Utkin V.A., Puzikov V.I., Kobzev P.N. *Board-Bonded Span*. Patent RF, no. RU 2 204 644 C2, 2003. (In Russ.).

10. Патент 35636 РФ, МПК E01D 2/04. Пролетное строение с составными прогонами из бревен и железобетонной плитой: № 2003129340/20: заявл. 06.10.2003: опубл. 27.01.2004 / В.А. Уткин, В.И. Пузиков, Е.Ю. Селезень.

Utkin V.A., Puzikov V.I., Selezenev E.Yu. *Superstructure with a Reinforced Concrete Slab and Composite Girders of Logs*. Patent RF, no. RU 35636 U1, 2004. (In Russ.).

11. Патент 2258110 С1 РФ, МПК E01D 2/04. Дощато-клееное пролетное строение: № 2003134339/03: заявл. 26.11.2003: опубл. 10.08.2005 / В.А. Уткин, Г.М. Кадисов.

Utkin V.A., Kadisov G.M. *Glued Timber Span Structure*. Patent RF, no. RU 2 258 110 C1, 2005. (In Russ.).

12. Патент 69528 U1 РФ, МПК E01D 2/04. Плитное дощато-клееное пролетное строение: № 2006139544/03: заявл. 07.11.2006: опубл. 27.12.2007 / В.А. Уткин, Г.М. Кадисов, П.Н. Кобзев.

Utkin V.A., Kadisov G.M., Kobzev P.N. *Slab Board-Glued Superstructure*. Patent RF, no. RU 69 528 U1, 2007. (In Russ.).

13. Патент 2436889 С1 РФ, МПК E01D 2/04. Пролетное строение из коробчатых дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков: № 2010114485/03: заявл. 12.04.2010: опубл. 20.12.2011 / В.А. Уткин, В.И. Пузиков.

Utkin V.A., Puzikov V.I. *Superstructure from Box-Type Plank-Stacked-Towel-Nail Blocks*. Patent RF, no. RU 2 436 889 C1, 2011. (In Russ.).

14. Патент 106258 U1 РФ, МПК E01D 2/04. Дощато-клееное пролетное строение моста заводского изготовления: № 2010119623/03: заявл. 17.05.2010: опубл. 10.07.2011 / В.А. Уткин, О.С. Эпова.

Utkin V.A., Epova O.S. *Factory-Made Board-Glued Bridge Superstructure*. Patent RF, no. RU 106 258 U1, 2011. (In Russ.).

15. Патент 2574240 С1 РФ, МПК E01D 2/04. Пролетное строение из коробчатых дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков с железобетонной плитой: № 2014136865/03: заявл. 10.09.2014: опубл. 10.02.2016 / В.А. Уткин, П.Н. Кобзев, В.И. Пузиков, Б.В. Казанцев.

Utkin V.A., Kobzev P.N., Puzikov V.I., Kazantsev B.V. *Span from Boxy Boarded-Block-Dowel-Nail Units with Reinforced Concrete Board*. Patent RF, no. RU 2 574 240 C1, 2016. (In Russ.).

16. Патент 2731968 С1 РФ, МПК E01D 2/04. Деревобетонное пролетное строение из дощато-брусчато-нагельно-гвоздевых блоков с железобетонной плитой, включенной в совместную работу с блоками: № 2019117816: заявл. 07.06.2019: опубл. 09.09.2020 / В.А. Уткин, И.И. Готовцев.

Utkin V.A., Gotovtsev I.I. *Wood-Concrete Span from Plank-Cobble-Dowel-Nailing Blocks with Reinforced Concrete Plate, which is Included into Joint Operation with Blocks*. Patent RF, no. RU 2 731 968 C1, 2020. (In Russ.).

17. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 316 с.  
Rzhanitsyn A.R. *Compound Bars and Plates*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 316 p. (In Russ.).

18. Смирнов П.Н. Сравнение методик расчета нагельных соединений деревянных конструкций. Отечественный и зарубежный опыт // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 6. С. 68–72.

Smirnov P.N. Comparing Calculation Methods for Doweltype Connections in Timber Structures. Domestic and Foreign Experience. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 2013, no. 6, pp. 68–72. (In Russ.).



19. Смирнов П.Н., Шенгелия А.К. Особенности работы нагельных соединений со стальными накладками и прокладками. Методика расчета // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 2. С. 19–25.

Smirnov P.N., Shengelia A.K. Features of Plated Dowel Type Connections Performance. Calculation Methods. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 2015, no. 2, pp. 19–25. (In Russ.).

20. Стуков В.П. Анализ состояния мостов с балками из клееной древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2006. № 6. С. 52–57. URL: <http://lesnozhurnal.ru/upload/iblock/d42/d42084c600b91ccc1aa16e18223d16dd.pdf>

Stukov V.P. Bridges' State Analysis with Laminated Wood Beams. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2006, no. 6, pp. 52–57. (In Russ.).

21. Стуков В.П. Деревожелезобетонные балочные мосты на автомобильных дорогах. Архангельск: Севмашвтуз, 2009. 453 с.

Stukov V.P. *Timber-Reinforced Concrete Girder Bridges on the Roads*. Arkhangelsk, Sevmashtuz Publ., 2009. 453 p. (In Russ.).

22. Стуков В.П. Деревожелезобетонные балочные мосты: состояние, теория, исследование, проектирование: моногр. Архангельск: САФУ, 2014. 316 с.

Stukov V.P. *Timber-Reinforced Concrete Girder Bridges: State, Theory, Research and Designing*: Monograph. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2014. 316 p. (In Russ.).

23. Стуков В.П. Основы теории расчета деревожелезобетонных пролетных строений балочных мостов на автомобильных дорогах: моногр. Архангельск: САФУ, 2014. 170 с.

Stukov V.P. *Fundamentals of the Theory of Calculation of Wood Reinforced Concrete Span Structures of Beam Bridges on the Roads*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2014. 170 p. (In Russ.).

24. Уткин В.А. Проектирование и строительство балочного пролетного строения из клееной древесины // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: сб. докл. IX Междунар. конф. по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте, Санкт-Петербург, 27–28 мая 2014 г. СПб.: ПГУПС императора Александра I, 2015. С. 206–215.

Utkin V.A. Design and Construction of Girder Superstructure Made of Laminated Timber. *Problems of Strength of Materials and Structures in Transport: Proceedings of the IX International Conference*. Saint Petersburg, 2015, pp. 206–215. (In Russ.).

25. Уткин В.А., Готовцев И.И. Применение гребенчатых упоров для объединения железобетонной плиты и дощато-гвоздевой конструкции пролетного строения моста // Вестн. СибАДИ. 2020. Т. 17, № 3. С. 414–427.

Utkin V.A., Gotovtsev I.I. Crested Shear Connectors Application to Combine Reinforced Concrete Slab and Plank-Nailed Structure of Bridge Span. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 414–427. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-3-414-427>

26. Уткин В.А., Кобзев П.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния ребристого пролетного строения из клееной древесины // Изв. вузов. Строительство. 2005. № 10. С. 94–100.

Utkin V.A., Kobzev P.N. Studying the Stress-Strain Behavior of the Ribbed Superstructure Made of Laminated Timber. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, 2005, no. 10, pp. 94–100. (In Russ.).

27. Уткин В.А., Кобзев П.Н. О совершенствовании конструктивно-технологических форм плитно-ребристых пролетных строений из клееной древесины // Вестн. СибАДИ. 2019. Т. 16, № 1. С. 76–88.

Utkin V.A., Kobzev P.N. On Perfection of Constructive and Technological Forms of Plate and Ribbed Transfer Structures from Glued Timber. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 76–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-1-76-89>

28. Уткин В.А., Кобзев П.Н., Шатунова Е.Г. Разработка и совершенствование балочных пролетных строений на основе составных прогонов из бревен // Вестн. СиБАДИ. 2018. Т. 15, № 5. С. 760–773.

Utkin V.A., Kobzev P.N., Shatunova E.G. Development and Improvement of Beam Structures on the Basis of Composite Logs' Girders. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2018, vol. 15, no. 5, pp. 760–773. (In Russ.). <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-5-760-773>

29. Уткин В.А., Пузиков В.И., Кобзев П.Н. Опыт внедрения новой конструкции дощато-гвоздевого пролетного строения в дорожном строительстве Омской области // Дороги и мосты. 2008. Вып. 19/1. С. 162–174.

Utkin V.A., Puzikov V.I., Kobzev P.N. Introduction Experience of New Structure of Plank Nailed Span in Road Construction of Omsk Region. *Dorogi i mosty*, 2008, iss. 19/1, pp. 162–174. (In Russ.).

30. Ягнюк Б.Н. Теоретические основы проектирования деревянных конструкций по нормам Европейского союза – Еврокоду 5. Петрозаводск: ПетрГУ, 2002. 140 с.

Yagnyuk B.N. *Theoretical Foundations for Designing Wooden Structures in Accordance with the Standards of the European Union – Eurocode 5*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2002. 140 p. (In Russ.).

31. Cesaro G., Piva F. *Timber Bridges – Design and Durability*. Master's Thesis. Göteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, 2003.

32. Dyken T. Tynset Bridge. *Nordic Road and Transport Research*. 2002, no. 1.

33. Giluń A., Meronk J. *Stress-Laminated Timber T-Beam and Box-Beam Bridges*. Master's Thesis. Göteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, 2006. 125 p.

34. *Handbook 1 – Timber Structures*. TEMTIS, 2008. 243 p.

35. Jöbstl R.-A., Bogensperger T., Moosbrugger T., Schickhofer G. A Contribution to the Design and System Effect of Cross Laminated Timber. *Proceedings of the CIB W18, 39th Meeting*. Florenz, Italy, 2006.

36. Jutila A., Wiio M., Mäkipuro R., Haakana P., Wistbacka J., Salokangas L. *Development of Wood Bridges Research Project: Literature Survey of Shear Connections of Wood-Concrete Composite Bridges*. Espoo, TKK, 1994. 14 p.

37. Malo K., Holmestad A., Larsen P. Fatigue Strength of Dowel Joints in Timber Structures. *Proceedings of the 9th World Conference on Timber Engineering 2006 (WCTE 2006)*. Portland, OR, 2006, pp. 1400–1408.

38. Wacker J.P. *Cold Temperature Effects on Stress-Laminated Timber Bridges. A Laboratory Study*. Research Paper FPL–RP–605. Madison, WI, USDA, 2003. 22 p.

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

 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 630\*311+519.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-153-171

**Технологический алгоритм производства продукции  
из порубочных остатков***А.П. Мохирев<sup>1</sup>*, *д-р техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-9961-2019](https://orcid.org/0000-0002-1692-3323)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1692-3323>**К.П. Рукомойников<sup>2</sup>*, *д-р техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>**М.М. Герасимова<sup>3</sup>*, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [AAB-6823-2020](https://orcid.org/0000-0003-3544-187X)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3544-187X>**С.О. Медведев<sup>3</sup>*, *канд. экон. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-8240-2016](https://orcid.org/0000-0001-7459-3150)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7459-3150>**М.А. Зырянов<sup>3</sup>*, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-6950-2016](https://orcid.org/0000-0003-4525-2124)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2124>*<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, просп. Свободный, д. 82, г. Красноярск, Красноярский край, Россия, 660041; [ale-mokhirev@yandex.ru](mailto:ale-mokhirev@yandex.ru)<sup>2</sup>Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; [rukomojnikovkp@volgatech.net](mailto:rukomojnikovkp@volgatech.net)<sup>3</sup>Лесосибирский филиал Сибирского государственного университета им. академика М.Ф. Решетнева, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; [marina-gerasimov@list.ru](mailto:marina-gerasimov@list.ru), [medvedev\\_so@sibsau.ru](mailto:medvedev_so@sibsau.ru), [zyrynov\\_ma@sibsau.ru](mailto:zyrynov_ma@sibsau.ru)

---


*Поступила в редакцию 26.12.21 / Одобрена после рецензирования 22.03.22 / Принята к печати 27.03.22*

---

**Аннотация.** Одной из приоритетных задач лесной промышленности в настоящее время является повышение прибыли, получаемой с 1 га осваиваемого лесного участка. Этот показатель характеризует эффективность лесопользования и влияет на доступность древесных ресурсов. Одно из направлений решения данной задачи – разработка эффективных технологических цепочек производства товарной продукции из порубочных остатков древесины. В настоящее время существуют широкие возможности получения различной продукции из заготавливаемой древесины, в том числе и из отходов от ее заготовки и переработки. Ассортимент выпуска значительно дифференцирован по себестоимости и цене реализации. В российских реалиях одним из важных аспектов выступает спрос на отдельные виды продукции из древесных ресурсов, существенно уступающий в своем объеме зарубежным рынкам. Наиболее весомыми в структуре себестоимости продукции являются затраты, относящиеся к производственному процессу. При этом в зависимости от выбранной технологии, логистики, специфики производственных условий расходы могут существенно варьироваться по источникам образования и удельному весу в общей структуре. Множество факторов, влияющих на выбор вида производимой продукции и в конечном итоге на рациональный портфель товарной продукции, сложно учесть в оптимизационных задачах. Целью настоящего

---

© Мохирев А.П., Рукомойников К.П., Герасимова М.М., Медведев С.О., Зырянов М.А., 2023

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.

исследования стало формирование технологической цепочки процесса переработки порубочных остатков на стадии лесозаготовительного производства с получением эффективного портфеля товарной продукции в динамических природно-производственных условиях. Предлагается применить графоаналитическую модель, в которой вершинами графа являются лесосека, производственные операции и потребитель. Дуги данной модели характеризуются пропускной способностью, ограниченной производительностью или объемом сырья, доступного для выполнения операции, а также трудозатратами и затратами (переменными и постоянными). Следует отметить, что постоянные затраты возникают прежде всего при хранении древесины. Отличительная особенность предлагаемой модели – учет безвозвратных потерь, получаемых на определенных операциях производства и при длительном хранении лесоматериалов, используемых для изготовления товарной продукции, а также затрат на утилизацию остатков. Предложенные графоаналитическая модель и алгоритм решения поставленной задачи позволят определить оптимальные технологические цепочки переработки порубочных остатков древесины с получением портфеля товарной продукции.

**Ключевые слова:** порубочные остатки, доступность древесных ресурсов, портфель товарной продукции, графоаналитическая модель, технологический процесс, технологическая цепочка, динамические условия, переработка порубочных остатков

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Краевого фонда науки и ООО «Красресурс 24» в рамках научного проекта № 2022052708731.

**Для цитирования:** Мохирев А.П., Рукомойников К.П., Герасимова М.М., Медведев С.О., Зырянов М.А. Технологический алгоритм производства продукции из порубочных остатков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 153–171. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-153-171>

Original article

## Technological Procedure for the Manufacture of Products Using Felling Residues

**Aleksandr P. Mokhirev**<sup>1</sup>✉, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-9961-2019](https://orcid.org/0000-0002-1692-3323), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1692-3323>

**Konstantin P. Rukomojnikov**<sup>2</sup>, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

**Marina M. Gerasimova**<sup>3</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-6823-2020](https://orcid.org/0000-0003-3544-187X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3544-187X>

**Sergey O. Medvedev**<sup>3</sup>, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-8240-2016](https://orcid.org/0000-0001-7459-3150), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7459-3150>

**Mikhail A. Zyryanov**<sup>3</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-6950-2016](https://orcid.org/0000-0003-4525-2124), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2124>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, prosp. Svobodnyy, 82, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; [ale-mokhirev@yandex.ru](mailto:ale-mokhirev@yandex.ru)✉

<sup>2</sup>Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; [rukomojnikovkp@volgatech.net](mailto:rukomojnikovkp@volgatech.net)

<sup>3</sup>Lesosibirsk Branch of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Pobedy, 29, Lesosibirsk, Krasnoyarsk Krai, 662543, Russian Federation; [marina-gerasimov@list.ru](mailto:marina-gerasimov@list.ru), [medvedev\\_so@sibsau.ru](mailto:medvedev_so@sibsau.ru), [zyryanov\\_ma@sibsau.ru](mailto:zyryanov_ma@sibsau.ru)



---

Received on December 26, 2021 / Approved after reviewing on March 22, 2022 / Accepted on March 27, 2022

---

**Abstract.** Increasing the profit received from 1 hectare of the developed forest area is one of the priority tasks of the forest industry today. This parameter describes the efficiency of forest management and affects the availability of wood resources. One of the possible solutions of this issue is the development of effective technological chains of manufacturing commodity products from wood felling residues. Currently, there are ample opportunities to obtain various products from harvested wood, including wastes from its logging and processing. The product range is significantly differentiated by cost and selling price. In Russia one of the important factors is the demand for certain types of products from wood resources, which is significantly inferior in its volume to foreign markets. Costs related to the manufacturing process are the most significant in the structure of production costs. Meanwhile, expenses may vary dramatically depending on the chosen technology, logistics, and specific production conditions in terms of the formation sources and specific weight in the overall structure. The set of factors that influence the choice of the type of products to be produced and, ultimately, the reasonable portfolio of commodity products, is not easy to consider in the issues of optimization. The study aims at forming a technological chain of processing felling residues at the stage of logging operations with obtaining an effective portfolio of commodity products under dynamic natural and production conditions. We propose to apply a graph-analytical model, in which the peaks of the graph are the cutting area, production operations, and a consumer. The arcs of this model are characterized by the carrying capacity limited by the productivity or volume of raw materials available for the operation, as well as the labor and costs (variable and constant). It should be mentioned that fixed costs arise primarily in the wood storage. A distinctive feature of the proposed model is the accounting of irrecoverable losses resulting from certain production operations and from the long-term storage of timber used for manufacturing commodity products including the costs of their disposal. The proposed graph-analytical model and procedure for solving the problem will allow determining the optimal technological chains of processing of wood felling residues with obtaining a commercial yield portfolio.

**Keywords:** felling residues, availability of wood resources, commercial yield portfolio, graph-analytical model, technological process, technological chain, dynamic conditions, processing of felling residues

**Acknowledgments:** The research was financially supported by the Krasnoyarsk Regional Fund of Science and OOO "Krasresurs 24" within the framework of the scientific project No. 2022052708731.

**For citation:** Mokhirev A.P., Rukomojnikov K.P., Gerasimova M.M., Medvedev S.O., Zyryanov M.A. Technological Procedure for the Manufacture of Products Using Felling Residues. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 1, pp. 153–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-153-171>

### *Введение*

Доступность древесных ресурсов в большей степени определяется эффективностью лесозаготовок. Увеличение объема товарной продукции и, соответственно, прибыли, получаемой с 1 га осваиваемого участка, на сегодняшний день является приоритетной задачей развития лесной промышленности. Наиболее приемлемое направление решения данной задачи – переработка оставляемого на лесосеке в виде лесосечных отходов древесного ресурса. Однако специфичность получаемой товарной продукции, требуемых технологий делает такое производство недоступным.

Задача использования лесосечных отходов всегда привлекала многих исследователей, о чем свидетельствуют публикации [2, 10, 13, 19]. Однако широкого распространения на российских предприятиях предлагаемые технологии не получили. Большинство технологических процессов переработки вторичных древесных ресурсов – это производство топливной щепы [15, 20, 22]. Невысокая ценность данного продукта снижает эффективность его производства и, соответственно, экономическую доступность. При этом из такого сырья возможно производить различную более ценную продукцию: технологическую щепу для плитного и целлюлозно-бумажного производства, медицинские препараты, экстракты, парфюмерию, удобрения, подкормку для животных и др. [14].

Различную древесную товарную продукцию целесообразно производить из разных частей и пород дерева. Для производства подкормки для животных используют преимущественно листовенную древесину с большим количеством коры, а также хвою в качестве витаминов. При производстве удобрений также используют ветки с наличием хвои. Порода древесины играет важную роль при получении эфирных масел, экстрактов, медпрепаратов и т. п. При переработке сырья на технологическую щепу для целлюлозно-бумажного производства практически недопустимо наличие коры (разрешается лишь – 1–3 %) и гнили (1–7 %), а значит, древесину надо либо дополнительно обрабатывать (производить окорку и убирать гниль), либо использовать сырье с наименьшим содержанием нежелательных элементов (например, крупных сосновых сучьев). Можно предположить, что в некоторых случаях порубочные остатки целесообразно сортировать перед переработкой [7].

При формировании портфеля товарной продукции предприятия возникает сложная многовариантная задача: необходимо максимизировать суммарную стоимость продукции с наименьшими затратами на производство, при этом в качестве ограничений выступают объем спроса и объемы (запасы) сырья. Один из путей решения – применение методов экономико-математического моделирования [2, 4, 12].

Выбор рационального технологического процесса переработки порубочных остатков затруднителен в связи большим количеством вариантов последовательности операций. Стоит ли сортировать порубочные остатки, упаковывать их перед транспортировкой? На какой стадии их следует перерабатывать и как утилизировать безвозвратные отходы производства? Все эти вопросы возникают при планировании производственного процесса. В большинстве случаев сложность технологического процесса и риск отсутствия спроса делают переработку порубочных остатков в товарную продукцию непривлекательной для производителей.

Цель исследования – формирование технологической цепочки процесса переработки порубочных остатков на стадии лесозаготовительного производства с получением эффективного портфеля товарной продукции в динамических природно-производственных условиях.

#### *Объекты и методы исследования*

Одним из инструментов, используемых в решении поставленной задачи, может являться графоаналитическое моделирование. Методы обоснования нахождения кратчайших путей между вершинами графа описаны в



исследованиях Э.Ф. Мура [25], Р.В. Флойда [19], Э.В. Дейкстры [18], Р.Э. Беллмана [16] и др. Данные методы позволяют осуществить анализ статических элементов работы предприятий и служат базой для реализации стационарно-динамических задач потокового программирования при рационализации потоков в транспортных системах [1, 17, 21, 23]. Перечисленные методики и алгоритмы могут использоваться при рассмотрении операций технологического процесса лесозаготовительных работ в динамике с представлением их в виде растянутых во времени графов.

В предыдущих работах авторов [8, 9, 24] предложены варианты технологических цепочек лесозаготовительных работ в виде динамической модели функционирования предприятия. Данная модель направлена на совершенствование процесса производства круглых лесоматериалов. Граф можно использовать для создания графической модели процесса производства товарной продукции из порубочных остатков древесины.

Предлагаемая в настоящем исследовании модель будет направлена на определение эффективных технологических цепочек переработки порубочных остатков древесины с нахождением оптимального портфеля товарной продукции. В качестве объекта труда в модели рассматриваются порубочные остатки древесины как вторичные ресурсы. Основные задачи создаваемой модели и методики решения:

определение эффективного варианта портфеля товарной продукции из вторичных древесных ресурсов;

формирование технологической цепочки производства товарной продукции из лесосечных отходов в различные периоды года;

определение эффективного распределения машинного ресурса при переработке лесосечных отходов;

установление суммарных безвозвратных потерь при реализации различных вариантов технологических цепочек переработки лесосечных отходов;

выявление суммарных затрат на утилизацию отходов, образующихся в процессе переработки вторичных древесных ресурсов;

выявление суммарных затрат на производство товарной продукции из лесосечных отходов в различные периоды года;

определение прибыли от продаж товарной продукции, производимой из лесосечных отходов в различные периоды года.

Методика учитывает следующие особенности производственно-экономических условий:

максимальную возможность определенного потребителя в приобретении определенного вида товара в определенный период года;

стоимость товарной продукции для определенного потребителя в определенный период года;

затраты на выполнение технологических операций при производстве товарной продукции из лесосечных отходов в различные периоды года;

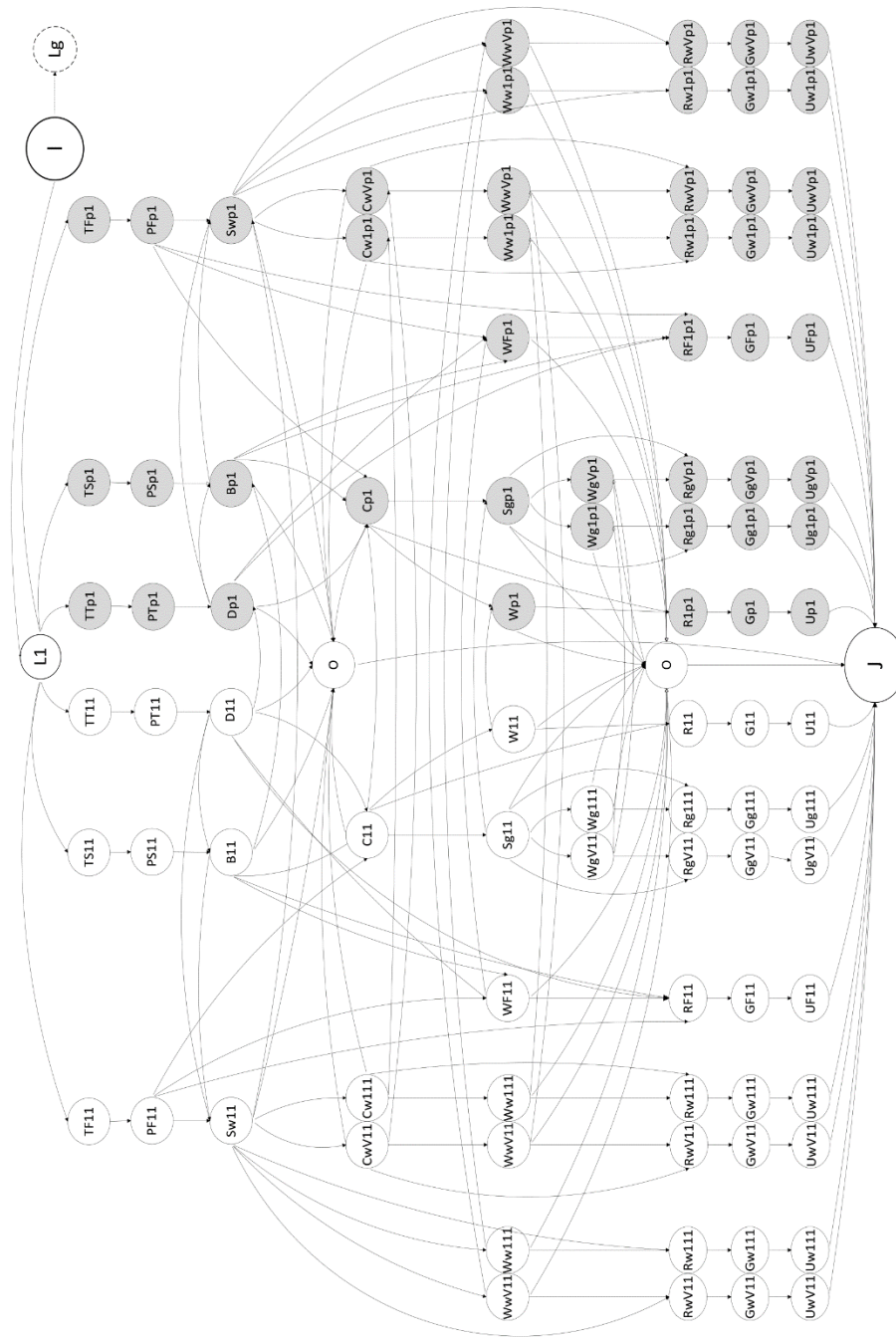
выход товарной продукции с безвозвратными потерями при переработке лесосечных отходов и их хранении между выполнением технологических операций в различные периоды года;

ресурсный потенциал лесосек при определении целесообразности и очередности переработки на них лесосечных отходов.

Создаваемый для решения задачи граф включает несколько копий каждой рассматриваемой вершины в каждом анализируемом временном

периоде  $\theta \in P$ . Число периодов может быть различным и зависит от объема и качества исходной информации и необходимой точности получаемых результатов. Множество вершин  $X_p$  графа  $G_p$  представлено в виде  $X_p = \{(x_i, \theta) : (x_i, \theta) \in X \times P\}$ . Множество дуг  $A_p$  задается дугами, ведущими из каждой пары «вершина–время»  $(x_i, \theta) \in X_p$  в каждую пару «вершина–время»  $(x_j, \theta)$  и  $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ ,  $\tau_{ij}(\theta)$  – продолжительность выполнения операции, соответствующей дуге  $(x_i, x_j)$ , в периоде  $\theta$ . Учитывается, что  $x_j \in \Gamma(x_i)$ ,  $\Gamma(x_i)$  – множество вершин, в которые направлены дуги из вершины  $x_i$ , а  $\theta + \tau_{ij}(\theta) \leq p$ . Пропускные способности  $V(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$  для пар «вершина–время»  $(x_i, \theta)$  и  $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$  составляют  $\infty$ , а пропускные способности  $V(x_i, x_j, \theta, \theta)$  для пар «вершина–время»  $(x_i, \theta)$  и  $(x_j, \theta) - V_{ij}(\theta)$  могут быть определены в результате анализа трудозатрат  $f_{ij}(\theta)$  на выполнение различных видов работ технологического процесса. Кроме того, в процессе сортировочных или обрабатывающих операций объем, входящий в вершину и выходящий из нее, будет изменен за счет разделения продукции или образования отходов.

На рис. 1 представлен граф, показывающий варианты технологических процессов переработки порубочных остатков древесины. Вершина  $I$  представляет собой фиктивный источник, вершина  $J$  – фиктивный сток. С фиктивного истока дуги поступают в вершины  $L_N$ , обозначающие лесосеки. Данные дуги характеризуют пропускную способность потока и определяются объемом вывозки древесины с соответствующей лесосеки  $V_N$ . Вся технологическая цепочка представлена на графе промежуточными вершинами, расположенными между вершинами, обозначающими лесосеки  $L$  и потребителей  $U$ . С вершин  $L_N$  дуги поступают в вершины  $M\theta N$  ( $M$  – наименование объекта труда при выполнении операции ( $T$  – деревья,  $S$  – хлысты,  $F$  – порубочные остатки)  $\theta$  – номер периода;  $N$  – номер лесосеки). Например, вершины  $T11, \dots, Tr1$  характеризуют операции транспортировки деревьев, выполняемые в каждом из  $p$  периодов для 1-й анализируемой лесосеки. После операций обрезки сучьев и раскряжевки объектом труда являются только порубочные остатки. Дуги, входящие в вершину, определяют собой операцию погрузки, выходящие из вершины – транспортировку древесины. Кроме операций погрузки и транспортировки в модель включены операции по переработке и сортировке древесины, пакетированию. Первые буквенные характеристики вершин обозначают вид технологической операции:  $TT$  – транспортировка деревьев;  $TS$  – транспортировка хлыстов;  $TF$  – транспортировка лесосечных отходов;  $PT$  – разгрузка деревьев;  $PS$  – разгрузка хлыстов;  $PF$  – разгрузка лесосечных отходов;  $D$  – обрезка сучьев;  $B$  – раскряжевка;  $Sw$  – сортировка непереработанных лесосечных отходов;  $Sg$  – сортировка переработанных отходов;  $Cw$  – переработка сортированных отходов;  $Ww$  – упаковка продукции, полученной из необработанных отходов;  $Rg$  – погрузка продукции, полученной из несортированных лесосечных отходов;  $G$  – транспортировка готовой продукции.



Графическая модель производства продукции из порубочных остатков древесины  
Graphical model of product manufacturing using wood felling residues

Операции по сортировке, переработке и пакетированию могут осуществляться в последующие периоды года. При этом при хранении часть древесных ресурсов нередко приходит в негодность. Объем невозвратных потерь поступает в вершину *O*.

Дуги характеризуются пропускной способностью, ограниченной производительностью  $\Pi$  или объемом сырья  $V_{XH}$ , доступного для выполнения операции  $H$  после операции  $X$ . Также дуги характеризуются трудозатратами  $f$ ,

переменными  $C$  и постоянными  $Z$  затратами. Постоянные затраты учитываются при хранении древесины между периодами. В дугах, выходящих из фиктивной вершины  $I$  в дуги, характеризующие лесосеки,  $V_{M\theta N}$  обозначает объем анализируемого предмета труда в определенный период  $\theta$ , перемещаемый с лесосеки  $N$ . В дугах, входящих в фиктивную вершину  $J$  из вершин потребителей, присутствует характеристика  $Q_{UM}$ , т. е. максимальный объем продукции  $M$ , возможный для приобретения потребителем  $U$ . Также данная дуга характеризует доход от реализуемой продукции  $C$ , получаемый от потребителя. Вследствие фиксации затрат на прочих дугах в виде положительных величин, данный показатель, являясь противоположностью затратам, указывается на графе с отрицательным знаком.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Математические зависимости для обоснования максимального потока минимальной стоимости в графоаналитической модели операционной сети технологического процесса обработки и переработки лесосечных отходов при их доставке с лесосек до потребителей с ограниченной потребностью и фиксированной ценой реализации продукции могут быть представлены в следующем виде.

Необходимо определить рациональный маршрут перемещения заданного объема лесоматериалов по дугам динамической операционной сети в анализируемых на графе периодах:

$$-\sum_{\theta=1}^p \sum_{(x_i, x_j) \in A} (C_{ij} \xi_{ij}(\theta) + Z_{ij} \min\{1; \xi_{ij}(\theta)\}) \rightarrow \max,$$

где  $\xi$  – величина потока.

Максимальный объем потока  $v$  за  $p$  периодов равен потоку, выходящему из источника за  $p$  периодов:

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{x_j \in X} [\xi_{ij}(\theta) - \xi_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] - v(p) = 0.$$

Объем потока  $\xi_{ji}$ , вошедшего в вершину  $x_i$  в момент времени  $(\theta - \tau_{ji})$ , равен числу единиц потока  $\xi_{ij}$ , выходящему из вершины  $x_i$  в момент  $\theta$ :

$$\sum_{x_j \in X} [\xi_{ij}(\theta) - \xi_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] = 0, x_i \neq I, J; \theta \in P.$$

Эта зависимость должна соблюдаться для всех вершин  $x_i$  без учета фиктивного источника и стока.

Максимальный объем потока  $v$ , перемещенного по дугам графа за  $p$  периодов, равен потоку, входящему в фиктивный сток за тот же период:

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{x_j \in X} [\xi_{ij}(\theta) - \xi_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] - v(p) = 0.$$

Итоговые трудовые затраты на реализацию одноименных операций технологической цепочки каждого  $(\theta)$  периода не могут превышать максимальной продолжительности  $(m)$  периода, ч. Следовательно, объем потока  $(\xi_{(i=b)j}^X(\theta))$ ,

протекающего по дуге  $(x_{i=b}, x_j)$  в рассматриваемом периоде  $(\theta)$ , должен удовлетворять следующему неравенству:

$$0 \leq \xi_{(i=b)j}^X(\theta) \leq \frac{m(\theta) - \sum_{i \in [1;b) \cup (b;g]} \sum_{x_j \in X} f_{ij}^X(\theta) \cdot \xi_{ij}^X(\theta)}{f_{(i=b)j}^X(\theta)},$$

где  $b$  – порядковый номер анализируемой дуги ( $1 \leq b \leq g$ );  $f_{ij}^X(\theta)$  – трудозатраты на обработку или перемещение единицы лесоматериалов при осуществлении  $X$ -й технологической операции на протяжении  $\theta$ -го периода, ч/м<sup>3</sup>;  $\xi_{ij}^X(\theta)$  – величина материального потока, перемещаемого с вершины  $i$  в  $\theta$ -й период при осуществлении  $X$ -й операции, м<sup>3</sup>.

Эта зависимость должна соблюдаться для всех периодов и вершин графа, кроме фиктивного источника и дуг, соединяющих между собой периоды:

$$\forall (x_i, x_j) \in A(\theta); \theta \in P; x_i \neq I; (x_i, x_j) \neq (x_{X_h \theta}; x_{X_h l(\theta+1)}),$$

где  $h$  – этап транспортировки;  $l$  – выполняемая операция.

Одним из основных параметров, ограничивающих максимальную пропускную способность исследуемых дуг, является производительность  $\Pi(\theta)$ . В данном случае этот показатель характеризует объем работ, который возможно выполнить до завершения анализируемого периода. По мере расчета в результате движения по исследуемым дугам графа определенного материального потока будет происходить уменьшение времени  $m^*(\theta)$ , оставшегося до завершения этапа:

$$m^*(\theta) = m(\theta) - \sum_{i=1}^g \sum_{x_j \in X} f_{ij}^X(\theta) \cdot \xi_{ij}^X(\theta).$$

При этом трудозатраты на выполнение той или иной операции технологического процесса лесозаготовительных работ и производительность машин и механизмов связаны друг с другом следующей математической зависимостью:

$$\Pi_{ij}^X(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{f_{ij}^X(\theta)},$$

и наоборот

$$f_{ij}^X(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{\Pi_{ij}^X(\theta)}.$$

При обосновании величины потока, протекающего по дугам графа, следует учитывать, что сумма объемов всех видов транспортируемой древесины, вывезенных с лесосеки  $L_N$  за все время ее освоения, не должна превышать максимального объема  $V_N$  заготовленной на ней древесины:

$$V_N \geq V_{wN} + V_{IN} + V_{JN}.$$

Таким образом, величина потока  $(\xi_{L_N(j=b)}(\theta))$ , протекающего по дуге  $(L_N, x_{j=b})$  от вершины  $L_N$  в анализируемом периоде  $(\theta)$ , должна соответствовать следующему неравенству:

$$0 \leq \xi_{L_N(j=b)}(\theta) \leq V_N - \sum_{\theta=1}^p \left( \sum_{j \in [1;b) \cup (b;g]} \xi_{L_N j}(\theta) - \xi_{L_N b}(\theta - \tau(\theta)) - \xi_{L_N b}(\theta + \tau(\theta)) \right).$$

При обосновании величины потока, протекающего по дугам графа, следует учитывать, что сумма объема всего сортируемого, обрабатываемого или упаковываемого в текущем периоде  $l$  сырья  $\left( \sum_{\theta=1}^l V_H(\theta) \right)$  должна быть равна сумме объемов  $k$  видов получаемой в результате выполнения операции  $H$  продукции  $\left( \sum_{j=1}^k V_{Hj} \right)$ , объема древесного сырья, оставляемого на хранение до последующих  $p$  периодов для выполнения операции  $H$   $\left( \sum_{\theta=l+1}^p V_H(\theta) \right)$ , и безвозвратных потерь древесины за счет проведения операции или длительного хранения ( $V_{HO}$ ):

$$\sum_{\theta=1}^l V_H(\theta) = \sum_{j=1}^k V_{Hj} + \sum_{\theta=l+1}^p V_H(\theta) + V_{HO}.$$

Таким образом, величина потока  $\left( \xi_{H(j=b)}(\theta) \right)$ , протекающего по дуге  $(H, x_{j=b})$  от вершины  $H$  в анализируемом периоде ( $l$ ), должна соответствовать ограничению:

$$0 \leq \xi_{H(j=b)}(l) = \sum_{\theta=1}^l V_H(\theta) - \sum_{\theta=1}^p \left( \sum_{j \in [1;b) \cup (b;k]} \xi_{Hj}(\theta) + \xi_{HO} - \xi_{Hb}(\theta - \tau(\theta)) - \xi_{Hb}(\theta + \tau(\theta)) \right).$$

Величина потока  $\left( \xi_{HO} \right)$ , протекающего по дуге  $(H, O)$  в анализируемом периоде ( $l$ ), должна соответствовать следующему ограничению:

$$0 \leq \xi_{HO} = \sum_{\theta=1}^l V_H(\theta) - \sum_{\theta=1}^p \left( \sum_{x_j \in X} \xi_{Hj}(\theta) - \xi_{Hj}(\theta - \tau(\theta)) - \xi_{Hj}(\theta + \tau(\theta)) \right).$$

Сумма объемов каждого вида реализованной потребителю ( $U$ ) древесины за все периоды освоения лесосек не должна превышать максимально желаемого этим потребителем объема данного вида приобретаемой продукции. Таким образом, величина потока  $\left( \xi_{(i=b)(j=U)}^y(\theta) \right)$  реализуемой потребителю продукции  $y$ , протекающего по дуге  $(x_{(i=b)}, x_{j=U})$  от вершины  $(i=b)$  в анализируемом периоде ( $\theta$ ), должна соответствовать следующему неравенству:

$$0 \leq \xi_{(i=b)(j=U)}^y(\theta) \leq Q_U^y - \sum_{\theta=1}^p \left( \sum_{i \in [1;b) \cup (b;g]} \xi_{iU}^y(\theta) - \xi_{bU}^y(\theta - \tau(\theta)) - \xi_{bU}^y(\theta + \tau(\theta)) \right).$$



Предложенная динамически изменяемая модель призвана реализовать графоаналитический подход обоснования: порядка действий при транспортировке (перемещении) древесины и древесных ресурсов с различных лесосек (лесной территории), необходимости и количества лесных складов (например, промежуточных), использования речной транспортировки и рейдов как объектов инфраструктуры, внедрения отдельных характеристик погрузочно-разгрузочных работ, сортировочных, упаковочных и иных обрабатывающих и перерабатывающих операций, выбора наиболее эффективного транспорта (водный, сухопутный), а также при определении конечного потребителя и востребованной на рынке товарной продукции, полученной из лесосечных отходов. При этом последние получают в условиях динамически изменяющейся природно-производственной среды. Характерной особенностью данной модели является учет безвозвратных потерь при определенных операциях производства и длительном хранении лесоматериалов, затрат на их утилизацию. Модель позволяет учесть и такие цепочки технологических операций по переработке древесных отходов, при которых отсутствуют безвозвратные потери и длительное хранение древесины. Например, при переработке отходов в технологическую щепу, ее дальнейшем сжигании и переводе тепловой энергии в электрическую.

Алгоритм решения поставленной задачи состоит из следующих этапов.

1. Берутся для расчета вершины и дуги графа от первого периода технологического процесса  $\theta = 1$ , с использованием варианта растянутого во времени графа  $G_p$ , относящегося к той или иной ситуации технологического процесса вывозки древесины с лесозаготовительных участков.

2. С учетом величины потоков  $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$  и  $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta)$ , перемещаемых по дугам графа  $G_p$ , строится остаточная ( $\mu$ ) сеть  $G_p^\mu = (X_p^\mu; A_p^\mu)$ . При этом каждая дуга новой сети, соединяющая пару «вершина–время»  $(x_i, \theta)$  с парой «вершина–время»  $(x_j, \theta)$ , по которой на первом этапе расчета пущен поток какой-либо величины, имеет обратную дугу, соединяющую  $(x_j, \theta)$  с  $(x_i, \theta)$ , с остаточной пропускной способностью  $V^\mu(x_j, x_i, \theta, \theta) = \xi(x_i, x_j, \theta, \theta)$  и стоимостью  $C^\mu(x_j, x_i, \theta, \theta) = -C(x_i, x_j, \theta, \theta)$ . Если величина перемещаемого потока  $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta)$  равна пропускной способности дуги, то  $C^\mu(x_j, x_i, \theta, \theta) = \infty$ . Если поток  $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta)$  или  $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$  перемещается по дуге, которой соответствуют постоянные затраты  $Z_{ij} \neq 0$  и при этом  $\theta \neq 1$ , то постоянные затраты, соответствующие одноименным операциям технологического процесса, принимаются равными 0. Движение обратного потока по любой из обратных дуг остаточной сети приводит к возможности увеличения пропускной

способности любой из дуг, характеризующих одноименную операцию технологического процесса в анализируемом интервале времени, на:

$$V_{N_n(i=b)j}^N(\theta) \leq \frac{\sum_{i \in [1;b) \cup (b;g]} \sum_{x_j \in X} f_{ij}^N(\theta) \cdot \xi_{ij}^N(\theta)}{f_{(i=b)j}^N(\theta)}.$$

Каждая дуга, соединяющая пару «вершина–время»  $(x_i, \theta)$  с парой «вершина–время»  $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ , имеет остаточную пропускную способность

$$V^u(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) = V(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) - \xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) = \infty$$

и обратную дугу с остаточной пропускной способностью

$$V^u(x_j, x_i, \theta + \tau_{ij}(\theta), \theta) = \xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$$

и стоимостью

$$Z^u(x_j, x_i, \theta + \tau_{ij}(\theta), \theta) = -Z(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)).$$

Остаточная сеть изначально совпадает с исходным графом.

Определяется путь  $P_p^u$  минимальной стоимости в построенной остаточной сети при  $C_{HO}^X(\theta) = \infty$  с использованием алгоритма Беллмана–Форда.

В случае если такого пути нет и выполнен анализ всех анализируемых  $p$  периодов, то логичным выводом будет соответствие ранее найденного варианта пути оптимальному варианту перемещения заданного потока и переход к этапу 10.

В случае если такого пути нет лишь в рамках подвергаемых анализу периодов (в момент времени  $(\theta)$ ) и есть возможность осуществить переход к следующему периоду  $(\theta + \tau_{js}(\theta))$ , то следует добавить к графу вершины и дуги следующего периода. Так как пропускные способности дуг каждого из периодов на участках, связанных с фиктивным источником и фиктивным стоком, зависят от потока, пущенного по аналогичным дугам прошлых периодов, то осуществляется расчет пропускных способностей его дуг, соединяющих пару «вершина–время»  $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$  с парой «вершина–время»  $(x_j^u, \theta + \tau_{ij}(\theta))$  и пару «вершина–время»  $(x_i^u, \theta + \tau_{ij}(\theta))$  с парой «вершина–время»  $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ , по формулам:

$$V_{L_N}(\theta + \tau_{ij}(\theta)) = V_N - \sum_{\theta=1}^{\theta=p} \xi_{L_N}(\theta);$$

$$V^y(\theta + \tau_{ij}(\theta)) = Q_U^y - \sum_{\theta=1}^{\theta=p} \xi^y(\theta).$$

Если путь найден, то осуществляется переход к следующему этапу.

3. Определяется максимальная пропускная способность выявленного пути минимальной стоимости в остаточной динамической сети:

$$\delta_p^\mu = \min \left\{ \begin{array}{l} \left( V^\mu(x_I, x_J^h), \right); \\ \text{где } (x_I, x_J^h) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \end{array} \right\};$$

$$\min \left( \begin{array}{l} V^\mu(x_I, x_i^h, \theta, \theta) + \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_i^h, x_J, \theta, \theta), \\ \text{где } (x_I, x_i^h) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \quad \text{И} \quad (x_i^h, x_J) \in P_{p(J \rightarrow J)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$\min \left( \begin{array}{l} V^\mu(x_i^h, x_J^h, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)), \\ \text{где } (x_i^h, x_J^h) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$\min \left( \begin{array}{l} V^\mu(x_i^h, x_j^{(h+1)}, \theta, \theta) + \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_j^{(h+1)}, x_i^h, \theta, \theta), \\ \text{где } (x_i^h, x_j^{(h+1)}) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \quad \text{И} \quad (x_j^{(h+1)}, x_i^h) \in P_{p(J \rightarrow J)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$\min \left( \begin{array}{l} \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_i^h, x_j^{(h+1)}, \theta + \tau_{ij}(\theta), \theta + \theta_{ij}(\theta)), \\ \text{где } (x_i^h, x_j^{(h+1)}) \in P_{p(J \rightarrow J)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$\min \left( \begin{array}{l} \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_j^h, x_i^h, \theta + \tau_{ij}(\theta), \theta); \\ \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_i^h, x_j^h, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)), \\ \text{где } (x_i^h, x_j^h) \in P_{p(J \rightarrow J)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$\left( \begin{array}{l} V^\mu(x_i^h, x_J), \\ \text{где } (x_i^h, x_J) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \end{array} \right);$$

$$\min \left( \begin{array}{l} V^\mu(x_i^h, x_J, \theta, \theta) + \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_J, x_i^h, \theta, \theta), \\ \text{где } (x_i^h, x_J) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \quad \text{И} \quad (x_J, x_i^h) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$f^* = \frac{f_{h,h+1}^*}{f_{h+1,h}^*},$$

где  $f_{h,h+1}^*$  – трудозатраты, характеризующие анализируемую насыщенную дугу узкого производственного участка в составе выбранного пути, направленную в момент времени  $\theta$  к фиктивному стоку, машино-смен;  $f_{h+1,h}^*$  – трудозатраты, характеризующие ответную анализируемой насыщенной дуге узкого производственного участка обратную дугу в момент времени  $\theta$  машино-смен.

4. Осуществляется обновление значений потоков по дугам графа  $G_p$  :

а) для дуг, соединяющих в графе  $G_p^u$  пары «вершина–время»  $(x_i^u, \theta + \tau_{ij}(\theta))$  и  $(x_j^u, \theta)$ , со стоимостью  $C(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) \leq 0$  поток  $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$  по аналогичным дугам графа  $G_p$ , направленным из  $(x_j, \theta)$  в  $(x_i, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ , заменяется на  $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) - \delta_p^u$ ;

б) для дуг, соединяющих в графе  $G_p^u$  пары «вершина–время»  $(x_i^u, \theta)$  и  $(x_j^u, \theta)$ , со стоимостью  $C(x_i, x_j, \theta, \theta) \leq 0$  поток  $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta)$  по аналогичным дугам графа  $G_p$ , направленным из  $(x_j, \theta)$  в  $(x_i, \theta)$ , заменяется на  $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta) - \delta_p^u$ ;

в) для дуг, соединяющих в графе  $G_p^u$  пары «вершина–время»  $(x_i^u, \theta)$  и  $(x_j^u, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ , со стоимостью  $C(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) \geq 0$  поток  $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$  по аналогичным дугам графа  $G_p$ , направленным из  $(x_i, \theta)$  в  $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ , заменяется на  $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) + \delta_p^u$ ;

г) для дуг, соединяющих в графе  $G_p^u$  пары «вершина–время»  $(x_i^u, \theta)$  и  $(x_j^u, \theta)$ , со стоимостью  $C(x_i, x_j, \theta, \theta) \geq 0$  поток  $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta)$  по аналогичным дугам графа  $G_p$ , направленным из  $(x_i, \theta)$  в  $(x_j, \theta)$ , заменяется на  $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta) + \delta_p^u$ ;

д) производится обновление значений потоков по дугам, соединяющим:

пару «вершина–время»  $(x_j^u, \theta)$  с парой «вершина–время»  $(x_i, \theta)$ , на величину с  $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta)$  на  $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta) - \delta_p^u$ ;

пару «вершина–время»  $(x_j, \theta)$  с парой «вершина–время»  $(x_i^u, \theta)$ , на величину с  $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta)$  на  $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta) - \delta_p^u$ .

5. Определяется стоимость принятого пути

$$\Sigma C = \sum_{(x_i, x_j) \in P_{p(I \rightarrow J)}^u} C_{(x_i, x_j)} + \left( \sum_{(x_j, x_i) \in P_{p(I \rightarrow J)}^u} C_{(x_j, x_i)} + \sum_{(x_i, x_j) \in P_{p(J \rightarrow I)}^u} C_{(x_i, x_j)} \right) \cdot f^*,$$

где  $P_{p(I \rightarrow J)}^u$  – участок пути, состоящий из прямых дуг, идущих в направлении от фиктивного источника до фиктивного стока;  $P_{p(J \rightarrow I)}^u$  – участок пути, включающий прямые и обратные дуги, направленный от фиктивного стока и возвращающийся обратно, создавая цикл;  $\sum_{(x_i, x_j) \in P_{p(I \rightarrow J)}^u} C_{(x_i, x_j)}$  – суммарные

переменные затраты на участке пути от фиктивного источника до фиктивного стока по прямым дугам, д.е.;  $\sum_{(x_j, x_i) \in P_{p(J \rightarrow I)}^{\mu}} C_{(x_j, x_i)}$  – суммарные переменные

затраты на циклическом участке пути по обратным дугам, д.е.;  $\sum_{(x_i, x_j) \in P_{p(J \rightarrow I)}^{\mu}} C_{(x_i, x_j)}$  – суммарные переменные затраты на циклическом участке пути по прямым дугам, д.е.

6. Если поток по дуге  $(x_H, x_j)$  – объем продукции, получаемой при выполнении операции  $H$ , – увеличился на величину  $\delta_p^{\mu}$ , то поток по дуге  $(x_H, x_O)$  увеличивается на величину  $q \delta_p^{\mu}$ , где  $q$  – доля безвозвратных потерь при выполнении операции  $H$  или длительном хранении, соответствующем ей. При этом  $q$  может равняться 0, если при выполнении операции  $H$  отсутствуют безвозвратные потери или длительное хранение древесины.

7. Выполняется расчет времени  $m^*(\theta)$ , оставшегося до конца периода.

8. Осуществляется замена пропускных способностей и веса дуг, соединяющих:

пару «вершина–время»  $(x_i, \theta)$  с парой «вершина–время»  $(x_j^{\mu}, \theta)$ , на величину с  $V_{L_n}(x_i, x_j, \theta, \theta)$  на  $V_{L_n}(x_i, x_j, \theta, \theta) - \delta_p^{\mu}$ ;

пару «вершина–время»  $(x_i^{\mu}, \theta)$  с парой «вершина–время»  $(x_j, \theta)$ , на величину с  $V^y(x_i, x_j, \theta, \theta)$  на  $V^y(x_i, x_j, \theta, \theta) - \delta_p^{\mu}$ .

Весовые характеристики обратных дуг, полученных при прохождении потока по дугам графа, равны  $C_{ji}^X = -C_{ij}^X$ .

Выполняется замена производительностей по дугам, соответствующим одноименным технологическим операциям:

$$\Pi_{ij}^X(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{f_{ij}^X(\theta)}.$$

Осуществляется замена объемов по дугам, соответствующим  $m$  различным вариантам использования  $j$ -й продукции, полученной в результате сортировки, при условии, что по одному из вариантов продукция используется:

$$V_n(x_{S_w}, x_j, \theta, \theta) = V_n(x_{S_w}, x_j, \theta, \theta) - \delta_p^{\mu};$$

$$V_n(x_{S_g}, x_j, \theta, \theta) = V_n(x_{S_g}, x_j, \theta, \theta) - \delta_p^{\mu}.$$

9. Строится остаточная сеть. Осуществляется переход к этапу 2.

10. Выполняется переход к первоначальному динамическому графу путем отбрасывания фиктивных вершин  $I$  и  $J$ .

Такой подход к решению задачи наряду с анализом экономичности производства товарной продукции отличается возможностью учета безвозвратных потерь, получаемых при определенных операциях производства и длительного хранения лесоматериалов при изготовлении различной товарной продукции, а также затрат на утилизацию остатков. Полученные результаты согласуются с известными представлениями [3, 5, 6, 11] об

эффективности освоения древесных ресурсов и повышении доступности лесных ресурсов за счет увеличения товарной продукции с 1 га лесной площади. Для широкого внедрения результатов исследования в производство целесообразна разработка программного обеспечения к решению задачи, которая позволит повысить степень автоматизации анализа ситуации на лесопромышленных предприятиях РФ.

#### Заключение

Предложенные графоаналитическая модель и алгоритм решения поставленной задачи позволят определить оптимальные технологические цепочки переработки порубочных остатков древесины с получением портфеля товарной продукции. Отличительной особенностью данной модели является учет безвозвратных потерь, получаемых при определенных операциях производства и длительного хранения лесоматериалов при изготовлении различной товарной продукции, а также затрат на утилизацию остатков.

Производство из порубочных остатков ценных товаров позволит увеличить прибыль, получаемую с 1 га осваиваемого лесного участка. Это положительно скажется на доступности не только деловой древесины, но и вторичных древесных ресурсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беляков С.Л., Белякова М.Л., Боженьюк А.В., Савельева М.Н. Оптимизация потоков в транспортных системах // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2014. № 5(154). С. 161–167.  
Belyakov S.L., Belyakova M.L., Bozhenyuk A.V., Savelyeva M.N. Optimization of Flows in Transport Systems. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2014, no. 5(154), pp. 161–167. (In Russ.).
2. Бурмистрова О.Н., Пильник Ю.Н., Мотрюк Е.Н. Математическая модель оптимального использования древесных отходов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1(13-1). С. 179–182.  
Burmistrova O.N., Pil'nik Yu.N., Motryuk E.N. Mathematical Model of Optimum Use of Wood Waste. *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2015, vol. 3, no. 2-1(13-1), pp. 179–182. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/10112>
3. Каракчиева И.В., Чумаченко С.И. Система оценки экономической доходности древесных ресурсов леса и экономической доступности лесных участков // Фундаментальные исследования. 2016. № 7-2. С. 372–377.  
Karakchieva I.V., Chumachenko S.I. System of the Assessment of Economic Profitability of Wood Resources of the Wood and Economic Availability of the Timberland. *Fundamental Research*, 2016, no. 7-2, pp. 372–377. (In Russ.).
4. Кириллов Ю.В. Многокритериальное моделирование как основа информационных технологий поддержки принятия решений // Фундаментальные исследования. 2004. № 6. С. 114–116.  
Kirillov Yu.V. Multicriteria Modeling as the Basis of Information Technology for Decision Support. *Fundamental Research*, 2004, no. 6, pp. 114–116. (In Russ.).



5. Куницкая О.А., Григорьев И.В. Перспективы увеличения объемов лесозэксплуатации за счет низкотоварной древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. № 3-2(8-2). С. 104–107.

Kunitskaya O.A., Grigorev I.V. Prospects for Increasing the Volume of Forest Exploitation due to Low Commodity Wood. *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2014, no. 3-2(8-2), pp. 104–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/3933>

6. Лукаш А.А., Матрос В.А., Шитикова А.С., Черенкова М.С. Повышение эффективности организации за счет производства экологически безопасных видов строительных материалов из древесины // Экономика и эффективность организации производства. 2016. № 24. С. 120–124.

Lukash A.A., Matros V.A., Shitikova A.S., Cherenkova M.S. Improving the Efficiency of the Organization Through the Production of Environmentally Safety Kinds of Building Materials Made Wood. *Ekonomika i effektivnost' organizatsii proizvodstva*, 2016, no. 24, pp. 120–124. (In Russ.).

7. Мохирев А.П. Моделирование процесса работы машины для сортировки и транспортировки порубочных остатков на лесосеке // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 1(29). С. 89–94.

Mokhirev A.P. Process Modeling for the Machine for Sorting and Transporting Felling Residues on the Cutting Area. *Systems. Methods. Technologies*, 2016, no. 1(29), pp. 89–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2016-1-89-94>

8. Мохирев А.П., Рукомойников К.П. Моделирование структуры лесотранспортных потоков: моногр. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2022. 396 с.

Mokhirev A.P., Rukomojnikov K.P. *Modeling the Structure of Forest Transport Flows: Monograph*. Yoshkar-Ola, VSUT Publ., 2022. 396 p. (In Russ.).

9. Рукомойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 94–107.

Rukomojnikov K.P., Mokhirev A.P. Validation of the Logging Operations Scheme Through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 4, pp. 94–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.94>

10. Суханов Ю.В., Герасимов Ю.Ю., Селиверстов А.А., Соколов А.П. Технологические цепочки и системы машин для сбора и переработки древесной биомассы в топливную щепу при сплошнолесосечной заготовке в сортиментах // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4. С. 101–107.

Sukhanov Yu.V., Gerasimov Yu.Yu., Seliverstov A.A., Sokolov A.P. Technological Chains and Machines Systems for Collecting and Processing Woody Biomass into Fuel Chips in Clear-Cutting Harvesting by Cut-to-Lengths. *Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 4, pp. 101–107. (In Russ.).

11. Третьяков А.Г. Экономическая доступность лесных ресурсов: факторы, ее определяющие, и достоверность оценки // Лесотехн. журн. 2015. № 1(17). С. 274–287.

Tretyakov A.G. Economic Accessibility of Forest Resources: Its Determining Factors and the Accuracy of the Estimates. *Forestry Engineering Journal*, 2015, no. 1(17), pp. 274–287. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/11285>

12. Тринеева Л.Т., Камнева В.А. Формирование сбытовой политики предприятия на основе экономико-математических методов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2015. № 2(6). С. 83–88.
- Trineeva L.T., Kamneva V.A. Formation of Marketing Policy of the Enterprise on the Basis of Economic and Mathematical Methods. *Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya*, 2015, no. 2(6), pp. 83–88. (In Russ.).
13. Шегельман И.Р. Обоснование технологических и технических решений для перспективных технологических процессов подготовки биомассы дерева к переработке на щепу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1997. 36 с.
- Shegelman I.R. *Substantiation of Technological and Technical Solutions for Promising Technological Processes of Preparing Wood Biomass for Processing to Wood Chips*: Dr. Eng. Sci. Abs. Saint Petersburg, 1997. 36 p. (In Russ.).
14. Шегельман И.Р., Рудаков М.Н. Рациональное природопользование в свете ресурсной концепции стратегического менеджмента // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2014. № 3(40). С. 214–216.
- Shegelman I.R., Rudakov M.N. Sustainable Nature Management in the Context of the Resource Concept of Strategic Management. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poriyadka*, 2014, no. 3(40), pp. 214–216. (In Russ.).
15. Щукин П.О., Демчук А.В., Будник П.В. Повышение эффективности переработки вторичных ресурсов лесозаготовок на топливную щепу // Инж. вестн. Дона. 2012. № 3. С. 395–398.
- Shchukin P.O., Demchuk A.V., Budnik P.V. Improving the Efficiency of Processing Secondary Logging Resources for Fuel Chips. *Engineering Journal of Don*, 2012, no. 3, pp. 395–398. (In Russ.).
16. Bellman R. On a Routing Problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1958, no. 16, pp. 87–90. <https://doi.org/10.1090/qam/102435>
17. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Rozenberg I. The Methods of Maximum Flow and Minimum Cost Flow Finding in Fuzzy Network. *Proceedings of the CDUD 2012 – Concept Discovery in Unstructured Data*. Leuven, Belgium, 2012, pp. 1–12.
18. Dijkstra E.W. A Note on Two Problem in Connection with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, vol. 1, pp. 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
19. Floyd R.W. Algorithm 97 – Shortest Path. *Communications of the ACM*, 1962, vol. 5, iss. 6, pp. 344–348. <https://doi.org/10.1145/367766.368168>
20. Gerasimov Yu., Senko S., Karjalainen T. Nordic Forest Energy Solutions in the Republic of Karelia. *Forests*, 2013, vol. 4, iss. 4, pp. 945–967. <https://doi.org/10.3390/f4040945>
21. Jourgholami M., Abdi E., Chung W. Decision Making in Forest Road Planning Considering Both Skidding and Road Costs: A Case Study in the Hyrcanian Forest in Iran. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2013, vol. 6, iss. 2, pp. 59–64. <https://doi.org/10.3832/ifor0640-006>
22. Karjalainen T., Asikainen A., Ilavsky J., Zamboni R., Hotari K.-E., Röser D. Estimation of Energy Wood Potential in Europe. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*. Helsinki, METLA, 2004. 43 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp006.htm>

---

23. Mokhirev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the optimal route of wood transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 226, art. 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012053>

24. Mokhirev A., Rukomojnikov K. Graphic-Analytical Modelling of Technological Chain of Logging Operations in Dynamic Natural and Production Conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 316, art. 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012039>

25. Moore E.F. The Shortest Path through a Maze. *Proceedings of the International Symposium on Theory of Switching*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1957, pp. 285–292.

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

Научная статья

УДК 662.6/9

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-172-185

## Повышение эффективности энергетического использования биотоплива

**В.К. Любов**<sup>✉</sup>, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [AAF-8949-2019](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-1212>

**И.И. Цыпнятов**, *мл. науч. сотр.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8074-7934>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; vk.lubov@mail.ru<sup>✉</sup>, ilya.tsypniatov@list.ru

Поступила в редакцию 25.01.22 / Одобрена после рецензирования 28.04.22 / Принята к печати 30.04.22

**Аннотация.** В современном мире растет доля теплоэлектростанций, потребляющих возобновляемые энергоресурсы. В качестве топлива все чаще применяются древесные и биоугольные гранулы. В технологическом цикле целлюлозно-бумажного производства образуется большое количество древесных отходов, которые необходимо эффективно использовать. Однако кородревесные отходы относятся к трудносжигаемым видам топлива, что вызывает необходимость «подсветки» факела высококалорийным невозобновляемым топливом и сопровождается образованием углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу. Для энергетического использования кородревесного топлива на российских предприятиях до сих пор используются котлоагрегаты КМ-75-40, снятые с производства в 1985 г. Энергетическое обследование котла КМ-75-40 при его работе на кородревесном топливе (кора хвойных и лиственных пород древесины, некондиционная щепка и опилки) показало, что конструкция и техническое состояние котлоагрегата не обеспечивают требуемую полноту выгорания горючих компонентов топлива и экологические показатели, соответствующие требованиям ГОСТ Р 50831–95. Целью данной работы является анализ возможностей комплексного повышения эффективности сжигания кородревесного топлива в котлоагрегатах КМ-75-40. По результатам выполненных исследований были разработаны первоочередные мероприятия для улучшения эффективности работы данных котлоагрегатов. Котлоагрегаты КМ-75-40 работают более 50 лет и требуют замены на современные низкоэмиссионные теплогенерирующие установки. Однако до замены рекомендуется модернизация котлоагрегатов: их перевод на работу по слое-вихревой технологии сжигания и использование в качестве добавки к кородревесному топливу биоугольных гранул для регулирования теплотехнических характеристик сжигаемого биотоплива и паропроизводительности котельных установок. Перспективными для этих целей биоугольными гранулами являются пеллеты, полученные из гидролизного лигнина, прошедшего мягкий пиролиз. Для оценки эффективности совместного сжигания кородревесного топлива и биоугольных гранул были выполнены тепловые и аэродинамические расчеты котла КМ-75-40 при разной доле гранул по тепловыделению, а также термогравиметрические исследования. При тепловом расчете учитывались: кратность циркуляции топливных частиц в вихревой зоне, гранулометрический состав сжигаемой топливной смеси, особенности расположения горелочных устройств, снижение загрязнения поверхности нагрева. Переход на сжигание данной топливной смеси по слое-вихревой технологии позволит отказаться от

использования невозобновляемых видов топлива в котлоагрегатах КМ-75-40 при сжигании высоковлажного кородревесного топлива, существенно повысит КПД котлов и уменьшит негативное влияние на окружающую среду.

**Ключевые слова:** котел, древесное топливо, биоугольные гранулы, гидролизный лигнин, вредные вещества, потери тепла, коэффициент полезного действия, слое-вихревое сжигание

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность ЦКП НО «Арктика» за предоставление возможности проведения исследований на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter.

**Для цитирования:** Любов В.К., Цыпнятов И.И. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 172–185. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>

Original article

## Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels

**Victor K. Lyubov**<sup>✉</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAF-8949-2019](https://orcid.org/0000-0001-7050-1212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7050-1212>

**Ilya I. Tsyppniatov**, Junior Research Scientist; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8074-7934>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; [vk.lubov@mail.ru](mailto:vk.lubov@mail.ru)<sup>✉</sup>, [ilya.tsyppniatov@list.ru](mailto:ilya.tsyppniatov@list.ru)

Received on January 25, 2022 / Approved after reviewing on April 28, 2022 / Accepted on April 30, 2022

**Abstract.** The share of thermal power plants that consume renewable energy resources is growing worldwide. Wood and bio-coal pellets become more and more common as fuels. The technological cycle of pulp and paper production produces a large amount of wood waste, which must be used efficiently. However, bark-wood waste is hard-burning fuel, which causes the need to “light” the flare with high-calorie non-renewable fuel, is followed by the formation of carbon dioxide emitted into the atmosphere. Boilers KM-75-40, taken out of production in 1985, are still used at Russian enterprises for the use of bark-wood fuel as an energy source. Energy examination of the boiler KM-75-40 during its operation with bark-wood fuel (coniferous and deciduous wood bark, substandard chips and sawdust) showed that the design and technical condition of the boiler does not provide the required combustion rate of fuel components and environmental parameters that meet the requirements of the state standard, GOST. The present work aims at analyzing the possibilities of comprehensive improvement of efficiency of bark-wood fuel combustion in boilers KM-75-40. High-priority measures to improve the efficiency of these boilers were developed based on the research results. Boilers KM-75-40 have been in operation for more than 50 years and require replacement with modern low-emission heat generating systems. Prior to replacement, however, upgrading the boilers is recommended: their transition to the layer-vortex combustion technology and the use of bio-coal pellets, as an additive to the bark-wood fuel, in order to adjust the thermal characteristics of the combusted biofuel and steam capacity of the boilers. Bio-coal pellets produced from hydrolysis lignin, which has undergone soft pyrolysis, are promising for this purpose. Thermal and aerodynamic calculations of the boiler KM-75-40 with different proportion of pellets by



heat release, as well as thermogravimetric studies were carried out to assess the effectiveness of co-combustion of bark-wood fuel and bio-coal pellets. The thermal calculation included: the circulation rate of fuel particles in the vortex zone, the granulometric composition of the combusted fuel mixture, the location features of combustion equipment, reducing the contamination of the heating surface. The transition to the combustion of this fuel mixture using the layer-vortex technology will allow to refuse from using non-renewable fuels in the boiler KM-75-40 when combusting high-moisture bark-wood fuel, will significantly increase the boiler efficiency and reduce the negative impact on the environment.

**Keywords:** boiler, wood fuel, bio-coal pellets, hydrolysis lignin, harmful substances, heat losses, efficiency, layer-vortex combustion

**Acknowledgements:** The authors are grateful to the Shared Use of Equipment Center “Arktika” for providing the opportunity to carry out research using the STA 449 F3 Jupiter synchronous thermal analyzer.

**For citation:** Lyubov V.K., Tsyornyatov I.I. Improving the Efficiency of Energy Use of Biofuels. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 172–185. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>

### *Введение*

Ключевой стратегией наиболее развитых стран мира по сохранению климата, защите окружающей среды и решению проблем с энергообеспечением является переход от ископаемых топлив к возобновляемым источникам энергии. Данная стратегия соответствует положениям Парижского соглашения [7, 19, 23, 25].

Среди возобновляемых энергоресурсов для России и многих других лесных регионов мира исключительно важная роль отводится биомассе [1–7, 9, 11, 20, 26]. Кроме нейтральности выбросов углекислого газа, важной особенностью данного энергоресурса является значительное снижение выбросов оксидов серы, азота и летучей золы [6]. В странах Европы и Северной Америки расширяется использование древесных и биоугольных гранул совместно с невозобновляемым топливом. Теплоэлектростанции для выработки электроэнергии потребляют примерно половину ежегодно производимых гранул. Биотопливный рынок развивается.

Современный технологический цикл целлюлозного-бумажного производства предполагает образование большого количества отходов, пригодных для энергетической утилизации путем сжигания. Проблема сжигания данных отходов заключается в их высокой влажности и неоднородности granulometric composition. Эта проблема решается добавлением в топочный процесс высококалорийного невозобновляемого топлива. При добавлении такого топлива в процессе сжигания образуется углекислый газ из ископаемого углерода.

Одно из направлений для получения обогащенного биотоплива из древесной биомассы – пеллетирование [5–7, 9, 11, 17, 21]. В сочетании с предварительной торрефикацией биомассы оно позволяет повысить энергетическую плотность биотоплива и увеличивает его устойчивость к воздействию влаги, способствует появлению других важных потребительских свойств [18, 23].



В целлюлозно-бумажной промышленности до настоящего времени применяются котлоагрегаты, оборудованные предтопками и топками с накладными беспровальными колосниками [2, 3]. Первичный воздух, проходя через зазоры колосников, обеспечивает выгорание топлива, способствует переносу очаговых остатков к нижнему концу колосниковой решетки, где они удаляются из предтопка.

Котлоагрегаты КМ-75-40 выпускались отечественными заводами серийно. В данных котлоагрегатах в качестве топлива могут быть использованы отходы окорки и лесопиления, мазут, природный газ, каменный уголь, высококалорийные виды топлива с побочными продуктами лесопромышленного комплекса [2, 3]. В котлах КМ-75-40 осуществляется естественная циркуляция. Они характеризуются П-образной компоновкой и призматической топкой размерами в свету 6000×6600 мм, с твердым шлакоудалением. При номинальной производительности 75 т/ч давление перегретого пара с температурой 440 °С составляет 4 МПа. Температура питательной воды – 150 °С. Предтопок и основная топочная камера, отделенные друг от друга экраном, представляют собой единое комбинированное топочное устройство. Их соединяют окна, выполненные фестонированием экранных труб.

Кордревесное топливо по течке поступает на неподвижную наклонную колосниковую решетку предтопка, где подсушивается, воспламеняется и частично сгорает. Дожигание топлива с наклонной решетки происходит на 2 цепных горизонтальных механических решетках прямого хода (ТЧ-3.07/56), расположенных в нижней части предтопка. Первичный воздух подается под наклонную колосниковую решетку и под цепные механические решетки с температурой 340–410 и 250 °С соответственно [2]. Две газомазутные горелки в предтопке обеспечивают «подсветку» топлива. Четыре горелки установлены на боковых стенах основной топочной камеры, расположение встречно-смещенное, по 2 горелки с каждой стороны. Котлоагрегаты КМ-75-40 сняты с производства (в 1985 г.) по следующим причинам: ограничение нагрузки котлоагрегата в случаях отсутствия подсветки резервным топливом; низкая экономичность топочного процесса; низкая надежность цепной колосниковой решетки; неудовлетворительные экологические показатели. Несмотря на это их эксплуатация на предприятиях РФ продолжается.

Цель данной работы – анализ возможностей комплексного повышения эффективности сжигания кордревесного топлива (КДТ) в котлоагрегатах КМ-75-40.

#### *Объекты и методы исследования*

Энергетическое обследование котлоагрегата КМ-75-40 проводилось на базе филиала АО «Группа «Илим» в г. Коряжма в соответствии с методической базой и приборным парком, достаточно полно представленными в [5, 8, 12, 14]. При обследовании котлоагрегат работал на КДТ (кора хвойных и лиственных пород, некондиционная щепка и опилок) с отключенными газовыми горелками. Сжигаемое топливо характеризовалось высокой степенью неоднородности гранулометрического состава, зависимости полных остатков ( $R_x$ ) на ситах с различным размером ячеек ( $x$ ) представлены на рис. 1, при этом для КДТ средний коэффициент полидисперсности  $n = 0,55$ ; коэффициент, характеризующий крупность состава,  $b = 4,46 \cdot 10^{-3}$ .

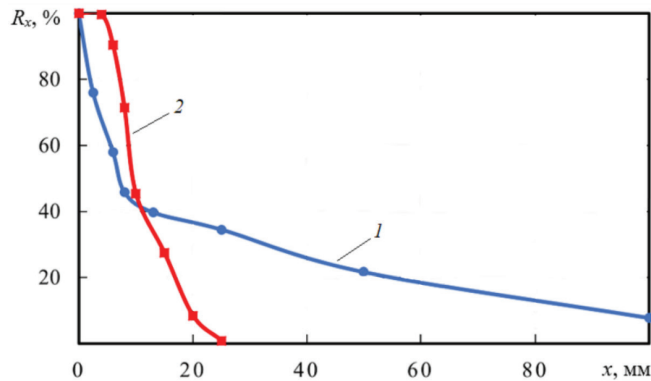


Рис. 1. Интегральные зерновые характеристики:  
 1 – кородревесное топливо; 2 – биоугольные гранулы  
 Fig. 1. Integral characteristics of grain: 1 – bark-wood fuel;  
 2 – bio-coal pellets

Балансовые опыты показали, что при относительной влажности сжигаемого биотоплива  $W_t^r = 56,65$  % приведенная паропроизводительность котла составляет 52 % от номинальной [22]. Конструкция данного котлоагрегата, техническое состояние и системы автоматического регулирования не соответствуют экологическим требованиям сегодняшнего дня, нет необходимой полноты выгорания горючих компонентов топлива. Так, концентрация оксида углерода в уходящих газах составила 9790 мг/нм<sup>3</sup>; концентрация кислорода – 6 %; потеря тепла с химическим недожогом – 4,28 %; средний КПД брутто котлоагрегата – 71,74 %; потери тепла с уходящими газами – 21,13 % [22].

По результатам выполненных исследований были разработаны первоочередные мероприятия для повышения эффективности работы котлоагрегата КМ-75-40 [22]. Установленные котлоагрегаты за более чем 50-летний срок службы устарели, необходимо запланировать их замену современными теплогенерирующими установками, в топочных камерах которых реализованы низкоэмиссионные схемы сжигания кородревесного топлива. До замены устаревших котлоагрегатов целесообразно обеспечить исключение использования высококалорийных невозобновляемых видов топлива в котлоагрегатах КМ-75-40 при сжигании высоковлажного КДТ. Для этого рекомендуются перевод данных котлов на слое-вихревую технологию сжигания [10] и применение в качестве добавки биоугольных гранул для регулирования теплотехнических характеристик сжигаемого древесного топлива и паропроизводительности котельной установки.

При использовании слое-вихревой технологии сжигания проявляются достоинства как слоевого, так и вихревого способов сжигания, она базируется на низкотемпературной (НТВ) технологии сжигания. Основные принципы построения такой технологии представлены в работах В.В. Померанцева и представителей его школы. При модернизации котлоагрегатов в Польше, РФ, Болгарии, США и Чехии были подтверждены достоинства и перспективность использования НТВ-технологии [6, 15, 16].

Современные низкоэмиссионные топочные устройства удовлетворяют следующим требованиям: обеспечивают низкотемпературный топочный про-

цесс; допускают рассредоточенную подачу воздуха и топлива, высоко экономичны при малых избытках воздуха; позволяют вводить сорбент, очищающий дымовые газы от оксидов серы [6, 15, 16]. Вихревые низкоэмиссионные топки (разновидность НТВ-технологии) сохраняют принципы традиционного прямоточного сжигания и за счет эффективной аэродинамики топочного процесса обеспечивают выполнение всех указанных требований. Данная схема не требует высоких затрат, поэтому возможно получить срок окупаемости не более 2 лет, в некоторых случаях – несколько месяцев.

Низкоэмиссионные вихревые топки имеют 2 зоны горения: вихревую низкотемпературную, занимающую нижнюю часть топки, и традиционную прямоточную. Аэродинамику вихревой зоны в рекомендуемом варианте реконструкции котлоагрегата [10] определяет взаимодействие 2 потоков – нижнего дутья, направленного вдоль заднего ската топочной воронки, и вторичного воздуха, вводимого через сопла, наклоненные вниз топки и расположенные на ее задней стене.

Наклонная неподвижная колосниковая решетка и 2 цепные горизонтальные механические решетки прямого хода, расположенные в предтопке, выполняют функцию устройств для термической подготовки КДТ и воспламенения наиболее мелких и сухих фракций топлива, обеспечивая подачу топлива в устройство нижнего дутья. Устройство нижнего дутья, выполненное в виде воздушно-каскадного классификатора (ВКК), обеспечивает постепенное снижение скорости горячего воздуха по мере его приближения к выходному сечению ВКК и последующего движения вдоль заднего ската топочной камеры. Термически подготовленное топливо с механических решеток поступает в нижнюю часть топочной воронки, при этом ВКК проводит его аэродинамическую классификацию по крупности частиц и их кажущейся плотности. Минеральные и инородные включения, плотность которых значительно больше, чем частиц древесного топлива, выводятся из топки. Крупные фракции древесного топлива, попадая в ВКК, проходят в нем дополнительную термическую подготовку, при этом в результате подсушки и термического разложения органических составляющих их кажущаяся плотность уменьшается, и они выносятся в топочную воронку вдоль ее заднего ската.

Мелкие и средние частицы древесного топлива, минуя ВКК, сразу направляются в топочную воронку. За счет вращательного движения газовых потоков, обеспечивающих многократную принудительную циркуляцию в вихревой зоне, увеличивается время пребывания топливных частиц в топке. Вследствие распределения горения топлива по всему объему топки, активной внутритопочной циркуляции газовых потоков выравниваются температурные и тепловые поля, повышается коэффициент тепловой эффективности топочных экранов. Все это снижает требования к качеству топлива, происходит выгорание даже немолотого топлива.

Избыток воздуха в предтопке и топочной воронке ниже стехиометрического. Это достигается интенсивной загрузкой вихревой зоны топливом с помощью цепных механических решеток прямого хода. Снижается образование оксидов азота в пониженном поле температур и при малых избытках воздуха. Образовавшиеся оксиды азота частично распадаются в зонах с полувосстановительной средой.

Таким образом, предлагаемая слое-вихревая технология сжигания реализует схему ступенчатого горения топлива, широко применяемую в мировой практике, но обладает существенной особенностью: хорошее перемешивание топлива и окислителя в нижней вихревой зоне и в зоне дожигания позволяет обеспечить экономичную работу котлов с более низкими, чем до модернизации, значениями коэффициента избытка воздуха на выходе из топки (1,12–1,15) без увеличения эмиссии оксида углерода.

Биоуголь получают в процессе торрефикации биомассы – низкотемпературной обработки (200–300 °С) без доступа кислорода – и используют как в порошкообразном, так и в обработанном (пеллеты, брикеты) виде. По энергетическим свойствам биоуголь максимально приближен к углю [18, 23]. Теплотворная способность готового продукта зависит от степени термической обработки: теплота сгорания может составлять от 18 до 31 МДж/кг (теплота сгорания древесного угля). Одна из задач, которую необходимо решить в процессе поиска режима торрефикации, – это нахождение режима, позволяющего при наименьшей потере исходной энергии добиться высокой теплотворной способности. Гранулы, прошедшие торрефикацию, подчиняются тем же законам измельчения, что и уголь, обладающий хорошей сыпучестью, гидрофобны и достаточно прочны. Транспортировка на большие расстояния такого топлива оправдана ввиду высокой энергетической плотности. По всем параметрам эти гранулы превосходят древесные пеллеты. В качестве объекта исследования взяты биоугольные гранулы из гидролизного лигнина, произведенные в ОАО «Бионет» (Архангельская область, г. Онега).

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

В состав КДТ входит кора хвойных и лиственных пород, а один из 3 котлоагрегатов Котласского ЦБК работает только на лиственном КДТ, в составе которого доминирует осина, поэтому были осуществлены термогравиметрические анализы при динамическом режиме для коры осины и биоугольных гранул, полученных из гидролизного лигнина, прошедшего мягкий пиролиз при температурах 190–210 °С. Образцы исследуемого топлива размолоты молотковой мельницей «Борей», просеяны на аналитическом ситовом анализаторе Retzsch AS 200 Control. Для выполнения работ на термоанализаторе использовалась фракция с размером частиц от 250 до 500 мкм.

Теплотехнические характеристики для коры осины имели следующие значения: влажность  $W^a = 7,10$  %; зольность  $A^a = 2,48$  %;  $C^a = 50,48$  %;  $H^a = 5,90$  %;  $N^a = 0,72$  %;  $O^a = 33,32$  %; низшая теплота сгорания  $Q_{i}^a = 18,687$  МДж/кг и выход летучих веществ на горючую массу  $V^{daf} = 76,68$  %.

Термический анализ биотоплива проводился в среде аргона с расходом газа 20 см<sup>3</sup>/мин и в воздушной среде на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter. Образцы нагревались со скоростью 10 °С/мин до 800 °С. По результатам исследований были получены термограммы, одна из которых показана на рис. 2. Для анализа процессов сушки, термического разложения, воспламенения и горения использовались кривые, характеризующие изменение массы (ТГ), скорости изменения массы (ДТГ); а также тепловые эффекты, происходящие в исследуемых образцах (ДТА). Полученные данные и результаты исследований [24] приведены в таблице.

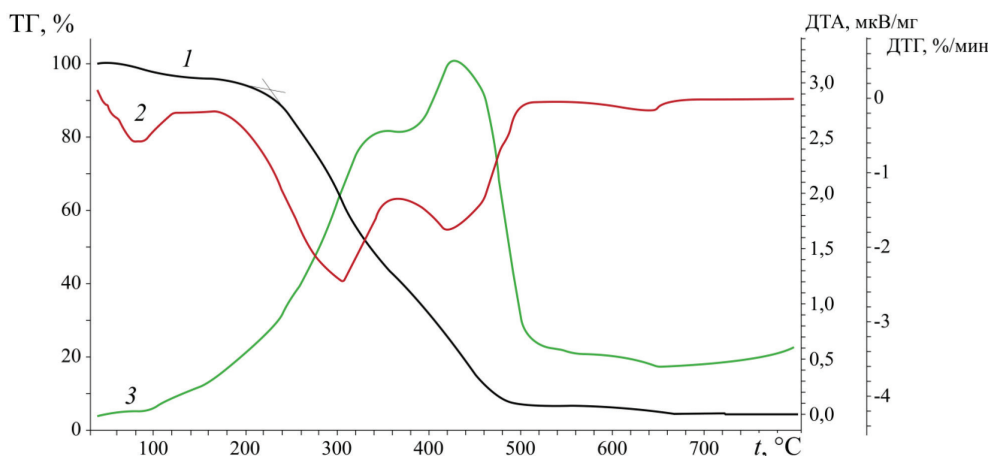


Рис. 2. Термограмма для коры осины при скорости нагрева 10 °С/мин в воздушной среде: 1 – ТГ; 2 – ДТГ; 3 – ДТА

Fig. 2. Thermogram for aspen bark at a heating rate of 10 °C/min in air. The curves describe: 1 – change in mass; 2 – rate of change in mass; 3 – thermal effects occurring in the studied samples

### Результаты (°С) термогравиметрического анализа видов биотоплива Results of thermogravimetric analysis of biofuels, °C

Образец	Температурные диапазоны при нагреве				
	в инертной среде		в воздушной среде		
	Сушка	Выход летучих веществ	Сушка	Выход и горение летучих веществ	Горение кокса
Древесина сосны	30–105	164–264*–400 (365) <sup>#</sup>	30–100	168–280*–373 (340) <sup>##</sup>	400–510 (477) <sup>###</sup>
Кора сосны	30–121	163–258*–400 (352)	30–108	168–263–355 (323)	382–514 (430)
Древесина ели	30–105	177–275*–400 (367)	30–101	180–280–368 (342)	374–500 (464)
Кора ели	30–106	140–225*–442 (347)	30–103	152–259–358 (320)	368–500 (423)
Биоугольные гранулы из лигнина	30–106	160–288*–480 (352)	30–102	160–251–356 (310)	360–540 (430)
Кора осины	30–130	165–245*–385 (334)	30–130	170–228–365 (307)	380–510 (414)

\* Температура начала интенсивного выхода летучих веществ; температура, соответствующая: <sup>#</sup> – максимальной скорости выхода летучих веществ, <sup>##</sup> – максимальной скорости выхода и горения летучих веществ; <sup>###</sup> – максимальной скорости выгорания коксового остатка.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для крупных фракций древесного топлива, попадающих в ВКК, будет происходить параллельное движение в глубь частицы 3 фронтов: испарения влаги, термического разложения органических составляющих биотоплива и горения углеродной основы топлива. Под действием термических процессов кажущаяся плотность биотоплива может снижаться более чем в 8 раз. Температура горячего воздуха, подаваемого в ВКК, превышает не только температуру, соответствующую максимальной скорости выхода и горения летучих веществ, но и температуру

воспламенения древесного кокса (см. таблицу), т. е. устройство нижнего дутья выполняет функции горелки. При обработке результатов опытов и экспериментов [24] были дополнительно определены температуры начала выхода летучих веществ и определяющие температуры для процесса горения кокса. Установление температур начала интенсивного выхода летучих веществ для всех видов биотоплива проводили с использованием одинакового методического подхода (метод касательных).

Положительный опыт эксплуатации котлоагрегатов, переведенных на низкоэмиссионную технологию сжигания [6, 15, 16], позволяет рекомендовать учитывать ее положительные стороны при реализации слое-вихревой схемы сжигания на котлоагрегатах КМ-75-40 [10]. Для отказа от применения высококалорийных невозобновляемых видов топлива при сжигании высоковлажного КДТ рекомендуется использование в качестве добавки биоугольных гранул. Это позволит регулировать теплотехнические характеристики сжигаемой биотопливной смеси и паропроизводительность котельной установки при минимальном воздействии на окружающую среду. В целях оценки эффективности совместного сжигания КДТ и биоугольных гранул были выполнены тепловые и аэродинамические расчеты котла КМ-75-40. Перспективными биоугольными гранулами являются пеллеты, полученные из гидролизного лигнина, подвергнутого мягкому пиролизу. Данные гранулы обладают хорошими гидрофобными свойствами и механической прочностью 85,5–95,2 %.

Элементный состав и низшая теплота сгорания на рабочую массу компонентов топливной смеси следующие: для КДТ  $W^r = 56,0$  %;  $A^r = 0,60$  %;  $C^r = 22,02$  %;  $H^r = 2,65$  %;  $N^r = 0,30$  %;  $O^r = 18,43$  %;  $Q_i^r = 6,90$  МДж/кг;  $V^{daf} = 84,80$  %; для биоугольных гранул  $W^r = 6,50$  %;  $A^r = 2,80$  %; органическая и колчеданная сера  $S_{op+k}^r = 0,16$  %;  $C^r = 55,07$  %;  $H^r = 5,00$  %;  $N^r = 0,25$  %;  $O^r = 30,02$  %;  $Q_i^r = 22,08$  МДж/кг;  $V^{daf} = 63,85$  %.

Тепловые расчеты котлоагрегата при совместном сжигании КДТ и биоугольных гранул выполнялись при разной доле гранул по тепловыделению:  $q_1 = 0$ ; 10; 20; 30; 40; 50; 60 %. Расчеты проводились при условии прямого совместного сжигания, предполагающего одновременную подачу КДТ и биоугольных гранул из гидролизного лигнина на наклонную неподвижную колосниковую решетку предтопка и далее с помощью механических решеток прямого хода в топочную камеру котла.

Предлагаемая слое-вихревая технология сжигания [10] не требует дополнительного измельчения биоугольных гранул. Исследование гранулометрического состава биоугольных гранул диаметром 8,0 мм (см. рис. 1), производимых из гидролизного лигнина, показало, что средние значения определяющих коэффициентов следующие:  $n = 3,444$ ;  $b = 5,57 \cdot 10^{-15}$ . При этом массовое содержание гранул длиной  $6,0 \leq l < 20,0$  мм составило 81,94 %. Таким образом, биоугольные гранулы имеют значительно более однородный и более мелкий гранулометрический состав, чем КДТ.

Тепловые расчеты исследуемого котлоагрегата выполнялись по методике [13]. В проведенных расчетах учитывались: совместное сжигание КДТ и биоугольных гранул; кратность циркуляции топливных частиц в вихревой зоне, расположение горелочных устройств; гранулометрический состав топлива; повышение коэффициента тепловой эффективности поверхностей нагрева [6]. Топочная воронка в расчетах учитывалась в активном объеме топочной камеры.



За счет увеличения доли биоугольных гранул в смеси общая влажность смеси снижается, низшая теплота сгорания и теоретическая температура горения ( $v_a$ ) повышаются. При сжигании такой смеси с увеличением доли биоугольных гранул растет КПД брутто котлоагрегата до  $\eta_{ка} = 91,6\%$  (при номинальной паропроизводительности), уменьшаются потери тепла с уходящими газами ( $q_2$ ) и полный расход топливной смеси ( $B$ ). Зольность топливной смеси возрастает, что связано с большей зольностью на сухую массу гидролизного лигнина по сравнению с КДТ (рис. 3). Критерий Стентона, характеризующий условия теплообмена, увеличивается с 0,42 до 0,55.

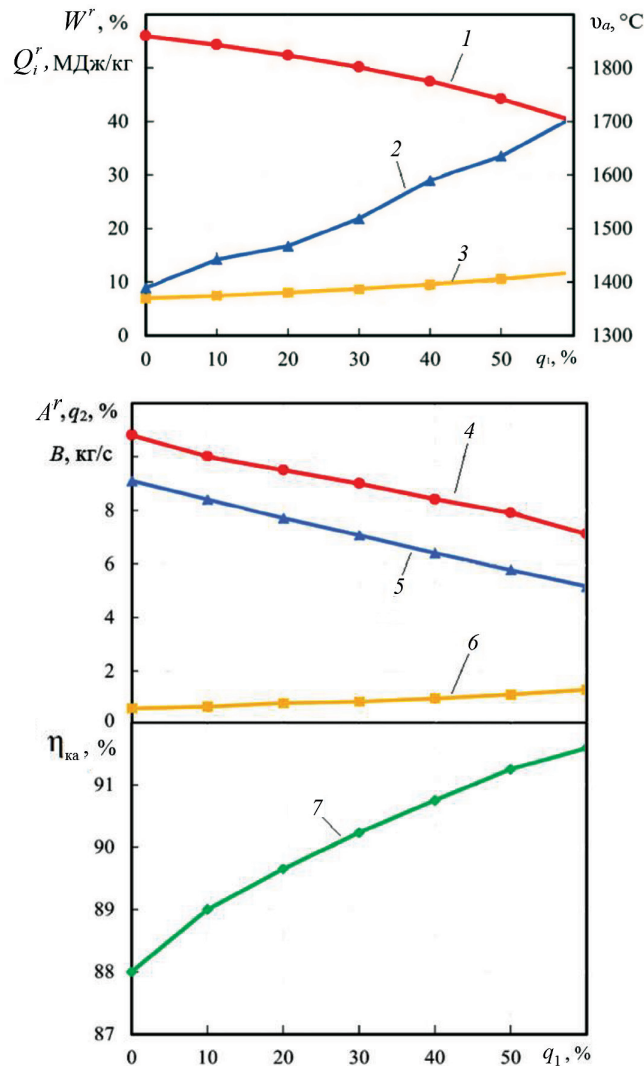


Рис. 3. Влияние доли биоугольных гранул в топливной смеси на ее теплотехнические характеристики и показатели работы котлоагрегата:

1 -  $W^r$ ; 2 -  $Q_i^r$ ; 3 -  $v_a$ ; 4 -  $A^r$ ; 5 -  $B$ ; 6 -  $q_2$ ; 7 -  $\eta_{ка}$

Fig. 3. The influence of the proportion of bio-coal pellets in the fuel mixture on its thermal characteristics and performance of the boiler: 1 -  $W^r$ ; 2 -  $Q_i^r$ ; 3 -  $v_a$ ;

4 -  $A^r$ ; 5 -  $B$ ; 6 -  $q_2$ ; 7 -  $\eta_{ка}$

Замещение биоугольными гранулами высококалорийных невозобновляемых видов топлива при сжигании высоковлажного КДТ позволяет значительно снизить выбросы углекислого газа. Для филиала АО «Группа «Илим» в г. Коряжма при среднегодовой нагрузке котлоагрегатов КМ-75-40, равной примерно 71 % от номинальной, и тепловой доле биоугольных гранул в топливной смеси 30 % снижение выбросов углекислого газа, исходя из расчета работы 3 котлов, составит более 69,805 тыс. т/год при использовании для подсветки природного газа и 98,244 тыс. т/год при сжигании мазута. Для этого потребуется закупка 57 238 т биоугольных гранул. Рынок биоугля в РФ только начинает формироваться: в 2015 г. ОАО «Бионет» был запущен первый в стране завод по производству торрефицированных гранул из гидролизного лигнина проектной мощностью 150 тыс. т/год. В соответствии с транспортной логистикой, возможным потребителем данной продукции мог бы быть целлюлозно-бумажный комбинат в г. Коряжма.

Добавка биоугольных гранул в топливную смесь оказывает значительное влияние на аэродинамическое сопротивление газового тракта котлоагрегата. Так, при тепловой доле биоугольных гранул в топливной смеси 60 % снижение сопротивления газового тракта при номинальной нагрузке котла составит более 42 %, что уменьшит затраты электроэнергии на обеспечение тяги и дополнительно повысит КПД нетто котлоагрегата.

#### *Заключение*

Энергетическое обследование показало, что конструкция и техническое состояние котлоагрегатов КМ-75-40 не обеспечивают требуемую полноту выгорания горючих компонентов топлива и приемлемые экологические показатели. Учитывая, что установленные котлоагрегаты эксплуатируются более 50 лет, характеризуются физическим износом и устаревшей конструкцией, необходимо запланировать замену данных котлоагрегатов на современные теплогенерирующие установки. До замены целесообразно обеспечить перевод котлоагрегатов на работу по слое-вихревой технологии сжигания и использовать в качестве добавки к кородревесному топливу биоугольные гранулы. Переход на сжигание данной топливной смеси по слое-вихревой технологии позволит отказаться от применения высококалорийных невозобновляемых видов топлива в котлоагрегатах КМ-75-40 при сжигании высоковлажного кородревесного топлива, существенно повысит КПД котлов и уменьшит негативное влияние на окружающую среду.

Термогравиметрические исследования, выполненные для разных видов биотоплива, входящих в состав сжигаемой смеси, а также тепловые и аэродинамические расчеты подтвердили перспективность разработанных рекомендаций, при этом в качестве добавки к кородревесному топливу следует использовать биоугольные гранулы, полученные из гидролизного лигнина, прошедшего мягкий пиролиз.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Башмаков И.А., Мышак А.Д. Затраты и выгоды реализации стратегий низкоуглеродного развития России: перспективы до 2050 г. // *Вопр. экономики*. 2014. № 8. С. 70–91.

Bashmakov I., Myshak A. Costs and Benefits of the Transition to Low-Carbon Economy in Russia: Perspectives up to 2050. *Voprosy Ekonomiki*, 2014, no. 8, pp. 70–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2014-8-70-91>

2. Головкин С.И., Коперин И.Ф., Найденов В.И. Энергетическое использование древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 221 с.

Golovkov S.I., Koperin I.F., Naydenov V.I. *Energy Use of Wood Waste*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 221 p. (In Russ.).

3. Жучков П.А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 407 с.

Zhuchkov P.A. *Thermal Processes in Pulp and Paper Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 407 p. (In Russ.).

4. Кокорин А. Новые факторы и этапы глобальной и российской климатической политики // Экон. политика. 2016. Т. 11, № 1. С. 157–176.

Kokorin A.O. New Factors and Stages of the Global and Russian Climate Policy. *Economic Policy*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 157–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.18288/1994-5124-2016-1-10>

5. Любов В.К., Владимиров А.М. Комплексная эффективность применения древесных гранул в энергоустановках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 1. С. 159–172.

Lyubov V.K., Vladimirov A.M. Complex Efficiency of Using Wood Pellets in Power Plants. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 1, pp. 159–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-159-172>

6. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск: САФУ, 2017. 533 с.

Lyubov V.K., Lyubova S.V. *Efficiency Improvement of the Biofuels Energy Use*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2017. 533 p. (In Russ.).

7. Макаров И.А., Чен Х., Пальцев С.В. Последствия Парижского климатического соглашения для экономики России // Вопр. экономики. 2018. № 4. С. 76–94.

Makarov I.A., Chen H., Paltsev S.V. Impacts of Paris Agreement on Russian Economy. *Voprosy Ekonomiki*, 2018, no. 4, pp. 76–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2018-4-76-94>

8. Методика измерения массовой концентрации сажи в промышленных выбросах и в воздухе рабочей зоны: утв. ОАО НИИ «Техуглерод». Ярославль, 2005. 10 с.

*Measurement Procedure of the Mass Concentration of Soot in Industrial Emissions and in the Air of the Working Area: Approved by ОАО Scientific Research Institute "Tekhuglerod"*. Yaroslavl, 2005. 10 p. (In Russ.).

9. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // Инж. вестн. Дона. 2015. № 2, ч. 2. С. 81.

Mokhirev A.P., Bezrukikh J.A., Medvedev S.O. Recycling of Wood Wastes of Timber Industry, as a Factor of Sustainable Resource Management. *Engineering Journal of Don*, 2015, no. 2, part 2, art. 81. (In Russ.).

10. Патент 2756712 С1 РФ. МПК F23В 10/00. Комбинированное топочное устройство для сжигания кородревесного топлива: № 2021106499: заявл. 12.03.2021: опубл. 04.10.2021 / В.К. Любов.

Liubov V.K. Combined Bark-Wood Firing Device. Patent RF, no. RU 2 756 712 C1, 2021. (In Russ.).

11. Сафонов Г.В., Стеценко А.В., Дорина А.Л., Авалиани С.Л., Сафонова Ю.А., Беседовская Д.С. Стратегия низкоуглеродного развития России. Возможности и выгоды замещения ископаемого топлива «зелеными» источниками энергии. М.: ТЕИС, 2016. 48 с.

Safonov G.V., Stetsenko A.V., Dorina A.L., Avaliani S.L., Safonova Yu.L., Besedovskaya D.S. *The Strategy of Low-Carbon Development of Russia. Opportunities and Benefits of Substitution of Fossil Fuels with Green Energy Sources*. Moscow, TEIS Publ., 2016. 48 p. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2954.5200>

12. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 272 с.

*Collected Procedures for Determining the Concentrations of Pollutants in Industrial Emissions*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1987. 272 p. (In Russ.).

13. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / ПАО «ЕЭС России», ВТИ, НПО ЦКТИ. СПб., 1998. 257 с.

*Thermal Calculation of Boilers (Standard Method)*. Saint Petersburg, 1998. 257 p. (In Russ.).

14. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 414 с.

Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeeva A.A. *Heating Tests of Boilers*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 414 p. (In Russ.).

15. Финкер Ф.З., Дульнева Л.Т., Кубышкин И.Б., Митрюхин А.Г., Дробышевский М.А. Результаты модернизации котла ПК-38 Назаровской ГРЭС с использованием ВИР-технологии «Политехэнерго» // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. науч. тр. СПб.: СПбГТУРП, 2005. С. 141–146.

Finker F.Z., Dul'neva L.T., Kubyshkin I.B., Mitryukhin A.G., Drobyshevskiy M.A. Results of Modernization of the Boiler PK-38 of the Nazarovo Power Station Using the Technology of Secondary Use of Roofing Felt "Politekhenergo". *Issues of Saving the Fuel and Energy Resources at the Industrial Enterprises and Thermal Power Stations: Collection of Academic Papers*. Saint Petersburg, SPb STUPP Publ., 2005, pp. 141–146. (In Russ.).

16. Финкер Ф.З., Кубышкин И.Б., Митрюхин А.Г., Шлегель А.Э., Сидоров Н.В., Царев С.А. Камерное сжигание дробленых назаровских углей на котле ПК-38 по схеме «Политехэнерго» // Новое в российской электроэнергетике. 2005. № 5. С. 34–41.

Finker F.Z., Kubyshkin I.B., Mitryukhin A.G., Shlegel' A.E., Sidorov N.V., Tsarev S.A. Chamber Combustion of Crushed Nazarovo Coals in a PK-38 Boiler According to the "Politekhenergo" Scheme. *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike*, 2005, no. 5, pp. 34–41. (In Russ.).

17. Arshadi M., Gref R., Geladi P., Dahlqvist S.-A., Lestander T. The Influence of Raw Material Characteristics on the Industrial Pelletizing Process and Pellet Quality. *Fuel Processing Technology*, 2008, vol. 89, iss. 12, pp. 1442–1447. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.001>

18. Bergman P. *Torrefaction for Biomass Co-Firing in Existing Coal-Fired Power Stations BIOCOAL*. ECN Report No. ECNC-05-013. Netherlands, 2005. 75 p.

19. Flach B., Bendz K., Krautgartner R., Lieberz S. *EU-27. Biofuels Annual*. GAIN Report No. NL3034. The Hague, USDA, 2013. 34 p.

20. Gera D., Mathur M.P., Freeman M.C., Robinson A. Effect of Large Aspect Ratio of Biomass Particles on Carbon Burnout in a Utility Boiler. *Energy & Fuels*, 2002, vol. 16, iss. 6, pp. 1523–1532. <https://doi.org/10.1021/ef0200931>

21. Kruggel-Emden H., Wirtz S., Scherer V. An Experimental Investigation of Mixing of Wood Pellets on a Forward Acting Grate in Discontinuous Operation. *Powder Technology*, 2013, vol. 233, pp. 261–277. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.08.029>

22. Lyubov V.K., Popov A.N., Maryandyshev P.A. Research of Efficient Burning of Bark and Wood Fuel. *International Science and Technology Conference "EastConf"*. Vladivostok, 2019, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EastConf.2019.8725391>

23. Magdziarz A., Wilk M., Straka R. Combustion Process of Torrefied Wood Biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, vol. 127, pp. 1339–1349. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5731-0>

24. Maryandyshev P.A., Chernov A.A., Popova E.I., Lyubov V.K. Thermal Decomposition and Combustion of Coals, Fuel Wood, and Hydrolytic Lignin, as Studied by Thermal Analysis. *Solid Fuel Chemistry*, 2016, vol. 50, iss. 3, pp. 167–176. <https://doi.org/10.3103/S0361521916030095>

25. Poletto M., Zattera A.J., Forte M.M.C., Santana R.M.C. Thermal Decomposition of Wood: Influence of Wood Components and Cellulose Crystallite Size. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 109, pp. 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.122>

26. Porfiriev B.N., Roginko S.A. Energy on Renewable Sources: Prospects for the World and for Russia. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 86, iss. 6, pp. 433–440. <https://doi.org/10.1134/S101933161606006X>

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ  
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО  
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.056.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-186-200

### Снижение колебаний массы бумаги в бумагоделательной машине

**В.П. Сиваков**, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAC-6084-2021*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>*

**А.В. Вураско**<sup>✉</sup>, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: AAC-5594-2021*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>*

**А.Л. Шерстобитов**, *инж.*; *ResearcherID: AAC-3200-2022*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-2878>*

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; sivakovvp@m.usfeu.ru, vurasko2010@yandex.ru<sup>✉</sup>, theonesunday@gmail.com

Поступила в редакцию 18.02.22 / Одобрена после рецензирования 13.05.22 / Принята к печати 16.05.22

**Аннотация.** Предмет исследования – санитарно-гигиеническая бумага. Объект – массоподводящая часть и круглосеточное формующее устройство напуска суспензии бумажной массы на сетку. Цель – выявление факторов, обуславливающих колебания массы санитарно-гигиенической бумаги, и уменьшение колебаний массы 1 м<sup>2</sup> бумаги, снижение неравномерности прочности в продольном и поперечном направлениях полотна бумаги. Методология работы состоит в изучении пульсации бумажной массы, колебаний массы снятых с янки-цилиндра (без крепирования) образцов полотна бумаги, определении разрывного усилия полотна бумаги в продольном и поперечном направлениях для установления влияния пульсации бумажной массы на колебания массы и прочности полотна бумаги. Исследования выполнены при выработке санитарно-гигиенической бумаги массой 17...18 г/м<sup>2</sup> на установившейся рабочей скорости машины 5 м/с. В массонапускном устройстве преобладают пульсации бумажной массы в низкочастотном спектре 0,14...1,35 Гц. Изготовлены образцы бумаги прямоугольной формы 432×230 мм. Размер 432 мм принят в продольном направлении движения бумаги в машине и равен 0,125 длины наружной окружности круглосеточного цилиндра. Размер 230 мм – наиболее распространенная на предприятиях ширина полотна бумаги в товарной бобине. Образцы изготовлены из одного полотна бумаги последовательно без промежуточных вырезов. Установлено, что частоты колебаний массы образцов на 86 % совпадают с частотами пульсации бумажной массы и на 14 % зависят от других факторов. Преобладают колебания частоты 1,45 Гц. Амплитуда отклонения массы образцов бумаги на этой частоте от среднего арифметического значения достигает 0,026 г. Разрывное усилие образцов в машинном направлении в 5,6 раза больше, чем в поперечном. Это вызвано отсутствием регулирования частоты вращения перфорированного вала и засорением его отверстий. Значительное изменение скорости потока бумажной

© Сиваков В.П., Вураско А.В., Шерстобитов А.Л., 2023



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



массы на коротком цилиндрическом участке вакуумных камер в сочетании с низким качеством промывки сетки круглосеточного цилиндра приводят к синхронности низкочастотной пульсации бумажной массы и колебаний массы образцов бумаги и, соответственно, бумажного полотна. Колебания массы бумажного полотна обуславливают частые обрывы бумаги и снижение качества товарной продукции.

**Ключевые слова:** масса 1 м<sup>2</sup> бумаги, пульсация бумажной массы, колебания массы бумаги, масса образцов бумаги, разрывное усилие, круглосеточный цилиндр, вакуумная камера, перфорированный вал, бумагоделательная машина, санитарно-гигиеническая бумага

**Для цитирования:** Сиваков В.П., Вураско А.В., Шерстобитов А.Л. Снижение колебаний массы бумаги в бумагоделательной машине // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 186–200. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-186-200>

Original article

## Reduction of Paper Pulp Fluctuations in Tissue Paper Making Machine

**Valeriy P. Sivakov**, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-6084-2021](https://orcid.org/0000-0002-9387-1512),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>

**Alesia V. Vurasko**<sup>✉</sup>, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-5594-2021](https://orcid.org/0000-0002-9471-085X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>

**Alexey L. Sherstobitov**, Engineer; ResearcherID: [AAC-3200-2022](https://orcid.org/0000-0002-7428-2878),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-2878>

Ural State Forestry Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; [sivakovvp@m.usfeu.ru](mailto:sivakovvp@m.usfeu.ru), [vurasko2010@yandex.ru](mailto:vurasko2010@yandex.ru)<sup>✉</sup>, [theonesunday@gmail.com](mailto:theonesunday@gmail.com)

Received on February 18, 2022 / Approved after reviewing on May 13, 2022 / Accepted on May 16, 2022

**Abstract.** The subject of the research is a paper for sanitary-hygienic purposes. The objects of the study are a pulper infeed system and a round grid perforated forming device. The purposes of the work are to identify sources and reduce fluctuations of 1 m<sup>2</sup> of pulp for sanitary-hygienic paper, which decrease the structural irregularities of the paper web in longitudinal and transverse directions. The methodology of the study is to investigate the flow pulsation of the pulp, the fluctuations of the pulp web at the Yankee cylinder (without crepe), to verify the tensile strength of the paper web in longitudinal and transverse directions for identification of a correlation between the pulsation, the vibration of the pulp and the strength of the paper web. The trials were made during the production of sanitary-hygienic paper with the mass 17–18 g/m<sup>2</sup> at a steady working speed of the machine 5 m/s. Pulsations of paper pulp in the low-frequency spectrum of 0.14–1.35 Hz prevail in the mass-intake device. The rectangular paper samples 432×230 mm<sup>2</sup> were created for examination of structural irregularities of the paper web. The length 432 mm was taken in the longitudinal direction of paper movement in the machine. It was equal to 0.125 mm in the circumference of the round grid screen cylinder. The width of the paper web in the commodity bobbin was 230 mm. The samples were made from a single sheet of paper sequentially without intermediate cuts at 5 m/s speed of the machine. It was determined that the frequencies of fluctuations of the masses of sanitary paper samples coincide by 86 % with the pulsation frequencies of the pulp and depend on



other factors by 14 %. The major frequency was 1.45 Hz. The amplitude of the deviation of the mass at this frequency from the arithmetic mean was 0.026 g. The tensile strength of the paper web in the machine direction was 5.6 times greater than in the transverse direction. It was caused by unregulated rotation frequency of the holey roll and clogging of its holes. The significant change of speed of the pulp flow on the short cylindrical part of the vacuum chambers initiated synchronically low frequency pulsation of the pulp and fluctuations of masses of the paper samples, therefore, the paper web in the machine. The irregularities of the structure of the paper web create the frequent paper breaks and reduced quality of the commodity products.

**Keywords:** mass of 1 m<sup>2</sup> paper web, pulp pulsation, pulp vibration, mass of paper samples, tensile strength of paper web, round grid screen cylinder, vacuum chamber, holey roll, tissue paper making machine, tissue paper

**For citation:** Sivakov V.P., Vurasko A.V., Sherstobitov A.L. Reduction of Paper Pulp Fluctuations in Tissue Paper Making Machine. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 1, pp. 186–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-186-200>

### Введение

Бумагоделательные машины (БДМ) по классификации оборудования можно рассматривать как автоматические поточные линии с жесткими связями (без заделов полуфабрикатов) между технологическими частями. Такие поточные линии эффективны при условиях непрерывного режима работы, узкого спектра видов вырабатываемой продукции, повышенного запаса надежности оборудования. Сокращение времени переналадки БДМ на выработку продукции, значительно отличающейся по массе 1 м<sup>2</sup> полотна бумаги, актуально.

В условиях рыночных отношений потребители бумажной продукции ориентированы в основном на небольшие партии закупок разных видов бумаги. Малые и средние предприятия целлюлозно-бумажной промышленности для удовлетворения требования рынка вынуждены расширять линейку вырабатываемых видов бумаги. В частности, на обследуемой БДМ планируют вырабатывать санитарно-гигиеническую бумагу (СГБ) массой 17...18 г/м<sup>2</sup> и этикеточную бумагу массой 40 г/м<sup>2</sup>.

Частая переналадка БДМ при выработке малых партий продукции занимает много времени. Переналадка происходит с обрывами и сопровождается длительной регулировкой вывода массы 1 м<sup>2</sup> полотна бумаги до заданного технологического значения. От потребителей поступают жалобы на неравномерную прочность полотна бумаги в машинном и поперечном направлениях. При изготовлении салфеток наблюдается периодическое изменение эффекта «раскрывания» листа салфетки по линиям сгиба, как продольного, так и поперечного направлений относительно полотна бумаги в товарном рулоне.

Перевод БДМ на производство продукции широкого спектра массы 1 м<sup>2</sup> бумаги сопряжен с исследованием таких динамических факторов, как пульсация бумажной массы в массоподводящей системе, колебания массы 1 м<sup>2</sup> полотна бумаги и неравномерность разрывного усилия в продольном и поперечном направлениях полотна бумаги.

Материалы по исследованию источников колебаний полотна этикеточной бумаги в машинном направлении представлены на международной научно-технической конференции [12]. В данной работе приведены результаты изучения динамических процессов и даны рекомендации по снижению их негативного

влияния при производстве санитарно-гигиенических и этикеточных видов бумажной продукции массой 18...40 г/м<sup>2</sup>. Колебания массы 1 м<sup>2</sup> бумаги влияют на обрывность полотна бумаги в процессе производства и являются одной из причин отклонения качественных показателей однородности бумаги от установленного технологического регламента. Вопросы изменения динамических состояний вибрационных технологических машин [5, 6, 10, 11, 14, 19], оптимизации параметров моделей БДМ [20], транспортирования полотна бумаги в БДМ, экспериментального моделирования напуска потока бумажной массы на формующие устройства [3, 17] и сушки полотна бумаги рассмотрены в работах авторов [15, 16, 18]. Способы напуска волокнистой массы на сетку БДМ и устройства для демпфирования колебаний бумажной массы при ее подаче в БДМ разработаны до уровня патентов [7–9], что свидетельствует об актуальности изучения динамики формования полотна бумаги.

Цель работы – выявление источников пульсации суспензии бумажной массы, уменьшение колебаний массы 1 м<sup>2</sup> бумаги и снижение неравномерной прочности в продольном и поперечном направлениях полотна бумаги.

Задачи:

определение частоты и амплитуды пульсации давления суспензии бумажной массы в массонапускном устройстве БДМ;

установление метрологических характеристик, частоты и амплитуды колебаний массы образцов полотна бумаги и разработка методов расчета массы 1 м<sup>2</sup> бумаги по статистическим характеристикам колебаний массы образцов;

проведение сравнительного анализа характеристик пульсации давления суспензии бумажной массы в массонапускном устройстве и колебания массы образцов полотна бумаги;

выявление источников неравномерной прочности в продольном и поперечном направлениях полотна бумаги.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектами исследования являются массоподводящая часть и круглосеточное формующее устройство напуска бумажной массы на сетку БДМ. Предметом – СГБ. Методы – вибрационные исследования пульсации суспензии в массонапускном устройстве, установление факторов, обуславливающих колебания полотна бумаги, экспериментально-статистические измерения массы 1 м<sup>2</sup> и разрывного усилия полотна бумаги (ГОСТ ИСО 1924-1–96). Изготовлены образцы СГБ в количестве 104 шт. из одного полотна бумаги последовательно без промежуточных вырезов. Скорость машины при выработке бумаги равна 5 м/с.

БДМ для производства бумаги бытового и санитарно-гигиенического назначения закуплена за рубежом, где работала 15 лет, в России эксплуатируется более 5 лет. Обследование машины осуществляли при переводе производства СГБ с массы 1 м<sup>2</sup> полотна бумаги 26...27 г на массу 1 м<sup>2</sup> полотна бумаги 17...18 г. Скорость БДМ увеличена до 300 м/мин.

БДМ имеет круглосеточное вакуумформующее устройство (рис. 1). На круглосеточном цилиндре вакуумформующего устройства под действием давления массы, вакуума и центробежных сил происходит формирование полотна бумаги на коротком цилиндрическом участке. Внутри вакуумформующего цилиндра установлены 3 вакуумные камеры (передняя камера при исследовании не имела разрежения воздуха) [4]. Бумажная масса подается к круглосеточному

цилиндру в зону формирования бумаги по сужающемуся каналу между сеткой цилиндра и губой массонапускного устройства. Сверху зона формирования бумаги ограничена сукном, снимающим бумагу с круглосеточного цилиндра.

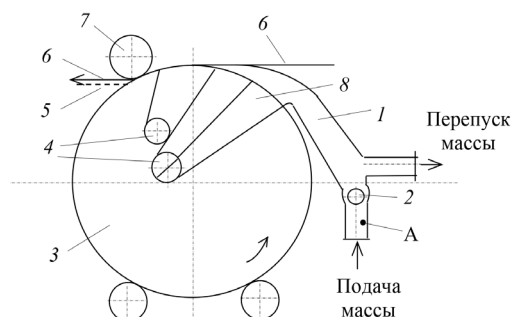


Рис. 1. Круглосеточное формующее устройство: 1 – массонапускное устройство; 2 – перфорированный вал; 3 – круглосеточный цилиндр; 4 – вакуумные камеры; 5 – полотно бумаги; 6 – съемное сукно; 7 – прижимной вал; 8 – камера без разрежения воздуха; А – точка измерения пульсации

Fig. 1. Round grid perforated forming device: 1 – pulper infeed system; 2 – holey roll; 3 – round grid screen cylinder; 4 – vacuum chambers; 5 – paper web; 6 – spare fabric; 7 – rider roll; 8 – air chamber; А – pulsation measurement point

В процессе формирования полотна бумаги скорость массы в начале канала массонапускного устройства превышает окружную скорость круглосеточного цилиндра, а в конце становится равна ей, так как вода фильтруется через сетку. Для регулирования начальной скорости в массонапускном устройстве предусмотрен канал перепуска массы.

В работе применены методы исследования пульсации бумажной массы и вибрации технологического оборудования [1, 2]. Измерения выполнены прибором СД-12. Пульсация бумажной массы определялась до и после смесительного насоса массоподводящей части, на выходе из сортировки «Ламорт» и в коллекторе массонапускного устройства БДМ.

#### Результаты исследования и их обсуждение

*Результаты исследования пульсации суспензии бумажной массы и вибрации оборудования.* Спектр пульсации давления в коллекторе вакуумформирующего устройства напорного ящика представлен на рис. 2.

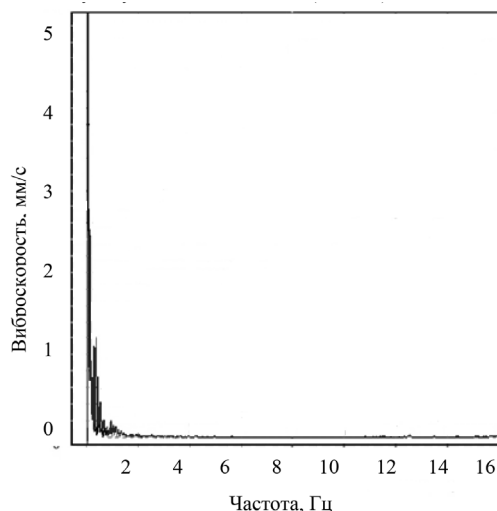


Рис. 2. Спектр пульсаций давления в коллекторе вакуумформирующего устройства напорного ящика

Fig. 2. Spectrum of pressure in the collector of vacuum forming device of the head box

На спектре отчетливо видны низкочастотные составляющие пульсации давления. Из низкочастотного спектра выделено 7 дискретных частот  $f_j$ ,  $j \in 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10$  и 7 соответствующих им амплитуд пульсации давления. Значения характеристик пульсации давления приведены в табл. 1. По мере увеличения частот  $f_j$  происходит снижение амплитуд пульсации давления (табл. 1).

На полученных спектрах видны частоты, соответствующие частотам пульсаций бумажной массы в коллекторе массонапускного устройства, оборотной частоте вращения круглосеточного цилиндра и ее гармоникам и субгармоникам.

Таблица 1

**Частоты, периоды и амплитуды пульсаций давления в коллекторе формирующего устройства**  
**Frequencies, periods and amplitudes of pressure pulsations in the collector of the forming device**

Дискретные частоты	Частота, Гц	Период, с	Амплитуда, кПа
$f_1$	0,14	7,14	2,4
$f_2$	0,29	3,45	1,1
$f_3$	0,40	2,50	1,2
$f_4$	0,53	1,89	0,4
$f_5$	0,68	1,47	0,1
$f_7$	0,98	1,02	0,1
$f_{10}$	1,35	0,74	0,05

*Результаты исследования колебания массы образцов полотна бумаги. Определение общей погрешности измерения массы образцов бумаги [13].* Для вырезания образцов бумаги применяли прямоугольный шаблон с размерами 432×230 мм. Размер 432 мм равен 0,125 длины окружности круглосеточного цилиндра. Одна развертка бумаги с окружности круглосеточного цилиндра соответствует длине 8 образцов. Размер 230 мм – наиболее востребованная потребителями ширина полотна бумаги в товарной бобине. При изготовлении шаблона использовали метрическую линейку с минимальной ценой деления 1 мм и транспортир с минимальной ценой деления 1°. Взвешивание образцов производили на лабораторных весах с ошибкой измерения 0,005 г. Перед взвешиванием образцов бумаги выполнено выравнивание влажности бумажного листа.

При расчете относительной погрешности  $P_1$  (%) измерений метрической линейкой принимали абсолютную погрешность измерений  $\Delta X_1 = 1,5$  мм:

$$P_1 = \frac{\Delta X_1}{X_{1\min}} \cdot 100 = \frac{1,5}{230} \cdot 100 = 0,65,$$

где  $X_{1\min} = 230$  мм.

Расчет относительной погрешности транспорта  $P_2$  (%) производили при абсолютной погрешности измерений  $\Delta X_2 = 3^\circ$ :

$$P_2 = \frac{\Delta X_2}{X_{2\min}} \cdot 100 = \frac{3}{87} \cdot 100 = 3,45,$$

где  $X_{2\min}$  – минимально измеренный угол, зафиксированный у одного из образцов бумаги,  $X_{2\min} = 87^\circ$ .

При расчете относительной погрешности весов  $P_3$  (%) принимали абсолютную погрешность измерений  $\Delta X_3 = 0,01$  г:

$$P_3 = \frac{\Delta X_3}{X_{3\min}} \cdot 100 = \frac{0,010}{1,708} \cdot 100 = 0,585,$$

где  $X_{3\min}$  – минимальная масса образца в исследуемой выборке,  $X_{3\min} = 1,708$  г.

Общую систематическую погрешность измерений (%) в эксперименте рассчитывали по формуле

$$P_\Sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^3 P_i^2} = \sqrt{0,65^2 + 3,45^2 + 0,585^2} = 3,56.$$

Для последующего выбора статистических характеристик (Кохрена, Стьюдента) задавали доверительную вероятность  $P$  из соотношения  $P \leq 100 - P_\Sigma \leq 100 - 3,56 \leq 96,44$  %, принимали  $P = 95$  %, или 0,95.

При математической обработке массы образцов бумаги определены среднее арифметическое значение массы  $\bar{m} = 1,743$  г/образец и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_m = 0,0137$  г/образец для исследуемой выборки.

Допустимые верхнее и нижнее отклонения массы  $\bar{m}$  (г) образцов бумаги вычисляли по формулам:

$$m_B = \bar{m} + t \sigma_m = 1,743 + 1,98 \cdot 0,0137 = 1,77;$$

$$m_H = \bar{m} - t \sigma_m = 1,743 - 1,98 \cdot 0,0137 = 1,72,$$

где  $t$  – квантиль  $t$ -распределения Стьюдента [12];  $t = 1,98$  при  $P = 0,95$  и числе образцов 104.

Зависимость массы последовательного ряда образцов бумаги от периода наработки и расчетные характеристики  $\bar{m}$ ,  $m_B$ ,  $m_H$  приведены на рис. 3.

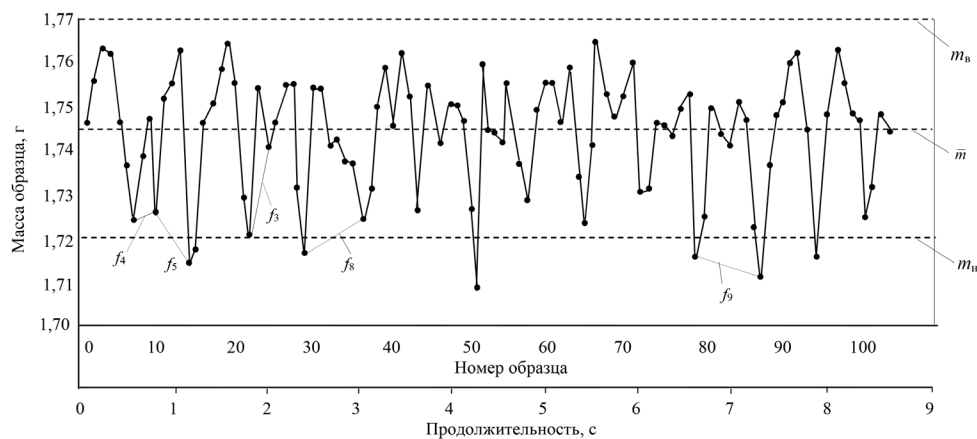


Рис. 3. Зависимость массы последовательного ряда образцов бумаги от наработки:  $\bar{m}$ ,  $m_H$ ,  $m_B$  – расчетные массы образцов;  $f_i$  – периоды частот  $i$ -х колебаний масс образцов

Fig. 3. The dependence of the mass of the paper samples in a sequential series to the operating time:  $\bar{m}$ ,  $m_H$ ,  $m_B$  – calculated mass of the samples;  $f_i$  – frequency periods of the  $i$ -th oscillations of the masses of the samples

Экспериментальную вероятность  $P_3$  обследованной выработки массы образцов (рис. 3) вычисляли по формуле



$$P_9 = \frac{z - (z_n + z_b)}{z} = \frac{104 - 7}{104} = 0,933, \quad (1)$$

где  $z$  – количество образцов в исследуемой выборке,  $z = 104$ ;  $z_n, z_b$  – количество образцов в исследуемой выборке, имеющих массу, соответственно выходящую за пределы нижнего и верхнего отклонений,  $z_n = 7, z_b = 0$ .

Из формулы (1) следует, что принятая в расчетах доверительная вероятность  $P = 0,95$  близка к зафиксированной в эксперименте и что в рабочем режиме, особенно при переналадке, есть вероятность обрывов полотна бумаги 6,7%. На основе анализа графика (рис. 3) выполнен расчет среднего арифметического значения массы  $\bar{M}$  (г) 1 м<sup>2</sup> полотна бумаги:

$$\bar{M} = k_a k_b \bar{m} = 2,3148 \cdot 4,3478 \cdot 1,743 = 17,54;$$

$$k_a = L/a = 1000/432 = 2,3148; \quad k_b = L/b = 1000/230 = 4,3478,$$

где  $k_a, k_b$  – коэффициенты подобия длин продольной ( $a = 432$  мм) и поперечной ( $b = 230$  мм) сторон образца соответственно и длины стороны 1 м<sup>2</sup> полотна бумаги ( $L = 1000$  мм).

Допустимую ошибку  $\Delta M$  массы (г) 1 м<sup>2</sup> бумаги вычисляли по передаточной функции, учитывая коэффициент подобия геометрических размеров:

$$\Delta M = k_a k_b t \sigma_m = 2,3148 \cdot 4,3478 \cdot 1,98 \cdot 0,0137 = 0,273.$$

Максимальную и минимальную массу (г) 1 м<sup>2</sup> полотна бумаги рассчитывали по формулам:

$$M_{\max} = \bar{M} + \Delta M = 17,54 + 0,273 = 17,81;$$

$$M_{\min} = \bar{M} - \Delta M = 17,54 - 0,273 = 17,27.$$

Для снижения обрывности полотна бумаги при переналадке и в установленном режиме работы предложено увеличить массу 1 м<sup>2</sup> полотна бумаги регулированием концентрации бумажной массы в напускном устройстве до  $\bar{M}_p = 18$  г/м<sup>2</sup>.

*Расчет воспроизводимости эксперимента.* Оценку экспериментальных измерений массы образцов бумаги производили для проверки их повторяемости в определенных пределах измерений с заданной доверительной вероятностью  $P$ . Выполнили 2 серии измерений массы образцов бумаги. В каждой серии устанавливали массу 5 образцов бумаги. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

### Результаты измерений массы образцов бумаги

#### The results of measurements and the calculates parameters based on the masses of the paper samples

Серия опытов	Масса $m_j$ образцов бумаги, г					Масса вычисленных характеристик, г	
	1	2	3	4	5	$\bar{m}_j$	$\bar{S}_j^2$ *
1	1,7638	1,7265	1,7539	1,7160	1,7308	1,7382	0,018
2	1,7470	1,7265	1,7627	1,7185	1,7165	1,739	0,016

\*Дисперсии массы образцов бумаги.

Средние арифметические значения массы образцов бумаги находили по формуле

$$\bar{m}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k m_{ij}, \quad i = \overline{1, \dots, k}.$$

Дисперсии массы образцов бумаги

$$S_j^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (m_{ij} - \bar{m}_j)^2, \quad i = \overline{1, \dots, k}.$$

Расчетный критерий Кохрена

$$G_p = \max S_j^2 / \sum_{j=1}^2 S_j^2 = 0,018 / (0,018 + 0,016) = 0,5294.$$

Расчетный критерий Кохрена  $G_p$  сравнивали с табличным критерием  $G$ . При доверительной вероятности  $P = 0,95$ , общем количестве дисперсий  $j = 2$  и числе  $f = k - 1 = 5 - 1 = 4$  имели  $G = 0,768$ . Так как  $G_p = 0,529 < G = 0,768$ , экспериментальные измерения масс образцов бумаги можно считать воспроизводимыми [10].

*Определение частот колебаний массы образцов полотна бумаги.* Для расчета частот колебаний массы образцов полотна бумаги использовали исходные данные: товарный рулон бумаги выработан при установившейся скорости машины  $V = 5$  м/с; образцы полотна бумаги изготовлены из одного товарного рулона бумаги последовательно без промежуточных вырезов. При рабочей скорости машины  $V = 5$  м/с с круглосеточного цилиндра съемным сукном (см. рис. 1) за время  $t_v = 1$  с происходит съем полотна бумаги длиной  $L_v = 5$  м.

Частоты колебаний (Гц) массы последовательного ряда образцов в продольном направлении вычисляли по формуле

$$f_i = \frac{L_v}{t_v z_i a} = \frac{5}{1 \cdot 8 \cdot 0,432} = 1,447 \approx 1,45,$$

где  $z_i$  – количество образцов в  $i$ -м периоде колебаний массы образцов,  $z_i = 8$ ;  $i \in 3, 4, 5, 8, 9$ ;  $a = 0,432$  м.

Расчетные частоты колебаний массы образцов бумаги  $f_i$  приведены в табл. 3. Принято допущение, что усадка полотна бумаги при контактно-конвективной сушке не превышает 2,8 % [4], в расчете этот показатель не учтен.

Таблица 3

**Характеристики колебаний массы смежных образцов санитарно-гигиенической бумаги с наружной поверхности круглосеточного цилиндра**

**Characteristics of mass fluctuations of sanitary-hygienic paper samples taken from the round grid screen cylinder**

Образец	Количество образцов	$f_i$ , Гц	Период колебаний массы образцов, с	Максимальная амплитуда колебаний массы, г/образец	Количество реализаций частоты в выборке, шт.
$f_3$	3	3,86	0,73	0,011	3
$f_4$	4	2,90	0,34	0,017	6
$f_5$	5	2,30	0,43	0,020	9
$f_8$	8	1,45	0,69	0,026	10
$f_9$	9	1,30	0,77	0,022	3

Далее было проведено сравнение частот пульсации давления суспензии бумажной массы  $f_j$  (см. табл. 1) и частот колебаний массы образцов бумаги  $f_i$  (табл. 3). Частота пульсации  $f_j = f_{10} = 1,35$  Гц совпадает с частотами  $f_i = f_8 = 1,45$  Гц и  $f_i = f_9 = 1,3$  Гц с незначительным отклонением (табл. 4). При равенстве частот  $f_i = f_j$  отмечено наиболее активное (близкое к резонансу) действие сил от пульсации давления на колебания массы формируемых образцов полотна бумаги.

Другие частоты пульсации давления  $f_j$  в разы меньше частот колебаний массы образцов. Активное влияние сил от пульсации давления с частотами  $f_j$  на колебания массы образцов  $f_i$  возможно при их кратности:

$$f_{ji} = k_{ji} f_i \cong f_i, \quad (2)$$

где  $k_{ji}$  – коэффициент кратности, определяемый подбором из ряда целых положительных чисел.

Например, для частот  $f_i = f_3 = 3,86$  Гц и  $f_j = f_7 = 0,98$  Гц коэффициент  $k_{73} = 4$ .

По формуле (2) получаем  $f_{ji} = f_{73} = 4 \cdot 0,98 = 3,92$  Гц.

Расчетные значения  $f_{ji}$ ,  $k_{ji}$  и отклонений частот  $f_{ji}$  от  $f_i$  приведены в табл. 4. Из 7 дискретных частот пульсации  $f_j$  (табл. 3) 6 совпадают с частотами колебаний массы образцов  $f_i$  или кратны им (см. табл. 1). Можно принять, что 6/7, или 86 %, пульсации активно влияет на частоты колебаний массы образцов.

Максимальные (амплитудные) отклонения массы образцов от среднего арифметического значения  $\bar{m}$  (рис. 3) наблюдаются при совпадении частот пульсации давления суспензии  $f_i = f_{10}$  и колебаний массы образцов  $f_j = f_8$  и  $f_j = f_9$ .

Таблица 4

**Сравниваемые характеристики пульсации давления в формирующем устройстве и колебания массы образцов бумаги**

**Compared characteristics of pressure pulsation in the forming device and fluctuations in mass of paper samples**

Частота пульсации давления $f_j$ , Гц $j \in 1, 2, 3, 5, 7, 10$	Коэффициент кратности $k_{ji}$	Кратная частота пульсации $f_{ji}$		Частота колебаний массы образцов $f_i$ , Гц	Отклонения частот $f_{ji}$ от $f_i$ , %
		обозначение	величина		
0,98	4	$f_{73}$	3,92	3,86	1,6
0,40	7	$f_{34}$	2,80	2,90	3,0
0,29	8	$f_{25}$	2,32	2,30	1,0
0,14	10	$f_{18}$	1,40	1,45	4,0
1,35	1	$f_{108}$	1,36		7,0
0,68	2	$f_{59}$		1,35	1,30
1,35	1	$f_{109}$	1,35		

Отклонения кратных частот пульсации давления  $f_{ji}$  от частот колебаний массы образцов полотна бумаги  $f_i$  (табл. 4) обусловлены погрешностями измерений.

Из результатов сравнения обработанных данных о пульсации бумажной массы и колебаниях массы образцов СГБ сделаны выводы:

частоты колебаний массы образцов СГБ на 86 % совпадают с частотами пульсации бумажной массы в массонапускном устройстве и на 14 % зависят от других факторов;

на графике рис. 3 преобладают колебания массы 8 смежных образцов на частоте 1,45 Гц (частоте колебания массы одной развертки окружности формулирующего цилиндра) с амплитудами отклонения массы до 0,026 г/образец;

второй по повторяемости в обследованной выборке является частота колебаний массы 2,3 Гц (5 смежных образцов) с амплитудой отклонения массы до 0,02 г/образец;

в пределах исследуемой выборки максимальное повторение колебаний массы (10 раз) одной развертки бумаги с наружной поверхности формулирующего цилиндра выявлено на частоте 1,45 Гц;

основной причиной синхронности низкочастотной пульсации 1,35...1,6 Гц суспензии в массонапускном устройстве и колебаний массы образцов бумажного полотна является «закупоривание–очистка» фрагментов сетки круглосеточного цилиндра, происходящее из-за отсутствия промывки сетки свежей водой.

Рассмотрели целесообразность подключения камеры без разрежения воздуха (см. рис. 1) к вакуумной системе. Круглосеточные вакуум-формулирующие цилиндры применяют при скоростях БДМ до 300 м/мин. При скорости машины 300 м/мин и более высоких скоростях в последней из 2 вакуумных камер создается глубокое разрежение воздуха, а перепад вакуума между камерами значителен [4]. Глубокое разрежение воздуха увеличивает скорость фильтрации и ухудшает отлив полотна бумаги. Для обеспечения качества отлива и снижения перепада вакуума между камерами применяют подключение к вакуумной системе передней (не имевшей разрежения воздуха) камеры и перераспределяют разрежение воздуха между 3 вакуумными камерами.

*Исследование разрывного усилия бумаги.* Образцы полотна бумаги выбраны в соответствии с технологией определения разрывного усилия (ГОСТ ИСО 1924-1–96). Данные исследования разрывного усилия бумаги опосредованно связаны с колебаниями массы образцов бумаги. При установленной длине и ширине образца колебания массы влияют только на толщину полотна бумаги, т. е. на разрывное усилие. Разрывное усилие (Н) вычисляли по формуле

$$F_p = \frac{\sigma}{b\delta},$$

где  $\sigma$  – максимальное напряжение в поперечном сечении образца бумаги, Па;  $b$ ,  $\delta$  – соответственно ширина и толщина образца бумаги, м.

Разрыву подвержено по 32 образца в продольном и поперечном направлениях. Массивы измеренных значений разрывного усилия образцов обработаны статистическими методами.

Средние арифметические значения разрывного усилия  $\bar{F}$  в машинном и поперечном направлениях полотна бумаги находили по формуле

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i, \quad n = 32.$$

В машинном направлении

$$\bar{F}_m = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} F_i = \frac{1}{32} \cdot 163,6 = 5,11.$$

В поперечном направлении

$$\bar{F}_n = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} F_i = \frac{1}{32} \cdot 29,25 = 0,91.$$

Коэффициент отношения среднеарифметических значений разрывных усилий устанавливали по формуле

$$k_f = \bar{F}_m / \bar{F}_n = 5,11 / 0,91 = 5,6.$$

Разрывное усилие образцов полотна в машинном направлении в 5,6 раза превышает усилие в поперечном направлении. Следовательно, при напуске бумажной массы из массонапускного устройства на круглосеточный цилиндр волокна ориентированы преимущественно в машинном направлении. В процессе изготовления салфеток (полотенец) полотно бумаги сгибают. При сгибании бумаги силы упругости от продольно ориентированных волокон раскрывают лист относительно линии сгиба, что нарушает форму и толщину пакета салфеток. Для устранения эффекта раскрывания необходимо обеспечить равномерную ориентацию волокон в плоскости листа бумаги. Это достигается равенством скоростей бумажной массы, выходящей из массонапускного устройства на сетку, и окружной скорости наружного диаметра круглосеточного цилиндра.

Исследованием разрывного усилия полотна бумаги в продольном и поперечном направлениях и визуальным осмотром отверстий установлено, что перфорированный вал массонапускного устройства имеет значительные засорения отверстий. Привод перфорированного вала работает с постоянной частотой вращения. При изменении скорости машины частота вращения перфорированного вала не меняется и не обеспечивает турбулентность потока. Необходимо установить привод перфорированного вала с регулируемой частотой вращения и периодически очищать отверстия вала от засорения.

По результатам исследования разработаны следующие рекомендации по усовершенствованию конструкции БДМ для уменьшения колебаний массы 1 м<sup>2</sup> бумаги, снижения неравномерности прочности в продольном и поперечном направлениях полотна бумаги:

установить устройство промывки сетки круглосеточного цилиндра и организовать постоянную промывку сетки свежей водой;

установить привод перфорированного вала с регулируемой частотой вращения и варьировать частоту вращения при изменении скорости машины, организовать периодическую очистку отверстий перфорированного вала при остановках БДМ;

подключить переднюю камеру круглосеточного цилиндра к вакуумной системе и отрегулировать вакуум в 3 вакуумных камерах;

при изменении скорости машины обеспечить равенство скорости напуска бумажной массы на сетку и окружной скорости круглосеточного цилиндра.

### *Заключение*

Выполнены измерения пульсации бумажной массы в массоподводящей системе круглосеточного формующего устройства бумагоделательной машины при производстве бумаги массой от 17 до 18 г/м<sup>2</sup>, исследованы колебания массы образцов бумажного полотна в машинном направлении, разрывного усилия образцов в машинном и поперечном направлениях. Установлено, что частоты колебаний масс санитарно-гигиенической бумаги совпадают на 86 % с частотами пульсации давления и на 14 % зависят от других факторов.

Выявлено, что разрывное усилие образцов бумаги в машинном направлении в 5,6 раза больше, чем в поперечном. Это обусловлено отсутствием регулирования частоты вращения перфорированного вала и низким качеством очистки его отверстий.

Значительное изменение скорости потока массы на коротком цилиндрическом участке вакуумных камер в сочетании с отсутствием устройства промывки круглосеточного цилиндра свежей водой и плохой очисткой перфорированного вала приводят к пульсации суспензии, колебаниям массы полотна бумаги и обрывам бумаги.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Vuong Q.C.* Новые возможности изменения динамических состояний вибрационных технологических машин // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2(38). С. 25–31.

Vuong Q.C. New Possibilities for Changing Dynamic Conditions of Vibration Technology Machines. *Systems. Methods. Technologies*, 2018, no. 2(38), pp. 25–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-25-31>

2. *Калита Г.А.* Напорный ящик бумагоделательной машинам // Электрон. науч. изд. «Уч. заметки ТОГУ». 2018. Т. 9, № 2. С. 1165–1168.

Kalita G.A. Headbox of Paper Machines. *Scientists Notes PNU*, 2018, vol. 9, no. 2, pp. 1165–1168. (In Russ.).

3. *Коряковская Н.В., Бедердинова О.И.* Контроль и регулирование влажности бумажного полотна // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 1. С. 188–204.

Koryakovskaya N.V., Bederdinova O.I. Monitoring and Control of Paper Web Moisture. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 1, pp. 188–204. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-1-188-204>

4. *Кугушев И.Д., Терентьев О.А., Куров В.С., Кокушин Н.Н., Бельский А.П., Кондрашкова Г.А., Коновалов А.Б., Королев В.И., Новиков Н.Е., Подковырин А.И., Смолин А.С., Швецов Ю.Н., Шульман Г.З., Эйдлин И.Я.* Машины для производства бумаги и картона / под ред. В.С. Курова, Н.Н. Кокушина. СПб.: Политехн. ун-т, 2017. 646 с.

Kugushev I.D., Terent'yev O.A., Kurov V.S., Kokushin N.N., Bel'skiy A.P., Kondrashkova G.A., Kononov A.B., Korolev V.I., Novikov N.E., Podkovyrin A.I., Smolin A.S., Shvetsov Yu.N., Shul'man G.Z., Eydlin I.Ya. *Machines for Production of Paper and Cardboard*. Ed. by V.S. Kurov, N.N. Kokushin. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2017. 646 p. (In Russ.).

5. *Кузубина Н.В., Санников А.А.* Виброзащита технологических машин и оборудования лесного комплекса: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2008. 210 с.

Kutsubina N.V., Sannikov A.A. *Vibrodamping of Technological Machines and Equipment of Forestry Complex*: Monograph. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2008. 210 p. (In Russ.).

6. *Муромцев Ю.А.* Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах: Методы, модели, алгоритмы. М.: Химия, 1990. 144 с.

Muromtsev Yu.A. *Fail-Safety and Diagnostics of Violations in Chemical Industries: Methods, Models, Algorithms*. Moscow, Khimiya Publ., 1990. 144 p. (In Russ.).

7. Патент 417565, М. Кл. D 21F 1/02. Напорный ящик бумагоделательной машины: № 1857918/29-33: заявл. 18.12.1972: опубл. 28.11.1974 / А.Л. Николаев, Ф.И. Ноздрачев.



Nikolayev A.L., Nozdrachev F.I. *Head Box for Paper Making Machine*. Patent USSR, no. SU 417565 A1, 1974. (In Russ.).

8. Патент 735184, М. Кл<sup>2</sup>. D21F 1/06. Устройство для демпфирования колебаний давления волокнистой массы при подаче ее в бумагоделательную машину: № 2528255/29-12: заявл. 05.10.1977: опубл. 25.05.1980 / А. Кирьявайнен.

Kiryavajnen A. *Apparatus for Damping Oscillation of Paper Pulp Pressure while Feeding a Paper-Making Machine*. Patent USSR, no. SU 735184 A3, 1980. (In Russ.).

9. Патент 2061813 С1 РФ, МПК D21F 1/02 Способ напуска волокнистой массы на сетку бумагоделательной машины: 92016114/12: заявл. 24.12.1992: опубл. 10.06.1996 / Ю.А. Тихонов, О.А. Терентьев, Г.Г. Шервашидзе.

Tikhonov Ju.A., Terent'ev O.A., Shervashidze G.G. *Method for Admission of Pulp onto Net of Paper-Making Machine*. Patent RF, no. RU 2 061 813 C1, 1996. (In Russ.).

10. Санников А.А., Куцубина Н.В., Васильев В.В. К вопросу определения нагруженности, напряженного и вибрационного состояний трубчатых валов бумагоделательных машин // Новая наука: от идеи к результату. 2016. № 10-3. С. 98–101.

Sannikov A.A., Kutsubina N.V., Vasiliev V.V. On the Issue of Determining The Loading, Stress and Vibration States of Tubular Shafts of Paper Making Machines. *Novaya nauka: ot idei k rezul'tatu*, 2016, no. 10-3, pp. 98–101. (In Russ.).

11. Санников А.А., Куцубина Н.В., Дубатовк В.А., Калимулина Т.В., Перескоков И.В. О методах прогнозирования вибрационного состояния бумагоделательных машин при планируемом увеличении их скорости // Вестн. ИжГТУ. 2012. № 2(54). С. 16–19.

Sannikov A.A., Kutsubina N.V., Dubatovk V.A., Kalimulina T.V., Pereskokov I.V. Methods of Forecasting the Vibration State of Papermaking Machines at Their Speed Planned Increase. *Vestnik IzhGTU*, 2012, no. 2(54), pp. 16–19. (In Russ.).

12. Сиваков В.П., Вураско А.В., Вихарев С.Н., Артемов А.В. Определение источников колебаний массы полотна этикеточной бумаги в машинном направлении // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.И. Комарова, Архангельск, 09–11 сент. 2021 г. Архангельск: САФУ, 2021. С. 372–377.

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Vikharev S.N., Artemov A.V. Determination of Sources of Fluctuations in Mass of Label Paper Web in the Machine Direction. *The Issues in Mechanics of Pulp-and-Paper Materials: Proceedings of the 6th International Conference in Memory of Professor Valery Komarov*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2021, pp. 372–377. (In Russ.).

13. Сиваков В.П., Вураско А.В., Леонович А.А. Основы научных исследований в химической и химико-механической переработке растительного сырья. Екатеринбург: УГЛТУ, 2021. 169 с.

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Leonovich A.A. *Fundamentals of Scientific Research in Chemical and Chemical-Mechanical Processings of Vegetal Raw Materials*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2021. 169 p. (In Russ.).

14. Сиваков В.П., Вураско А.В., Минакова А.Р. Влияние колебаний массы бумажного полотна на качество товарной продукции // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2(38). С. 133–138.

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Minakova A.R. The Influence of Fluctuations in the Mass of Paper Cloth on the Quality of Marketable Products. *Systems. Methods. Technologies*, 2018, no. 2(38), pp. 133–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-133-138>

15. Batchelor W.J., Wu Z., Johnston R.E. Measurement of z-Direction Moisture Transport and Shrinkage in the Drying of Paper. *Appita Journal*, 2004, vol. 57, no. 2, pp. 107–127.

16. Forughi A.F., Green S.I., Stoeber B. Optical Transparency of Paper as a Function of Moisture Content with Applications to Moisture Measurement. *Review of Scientific Instruments*, 2016, vol. 87, iss. 2, art. 023706. <https://doi.org/10.1063/1.4942251>

17. Hallajisani A., Shahbeig H., Hashemi S.J., Murray Douglas W.J. An Experimental Simulation Model for Coated Paper Drying. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2013, vol. 30, iss. 3, pp. 563–573. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322013000300014>

18. Harrmann M., Schulz S. Convective Drying of Paper Calculated with a New Model of the Paper Structure. *Drying Technology*, 1990, vol. 8, iss. 4, pp. 667–703. <https://doi.org/10.1080/07373939008959910>

19. Kuharchuk V.V., Katsiv S. Application of Wavelet-Transformations to the Tasks of Monitoring and Diagnostics of Machines and Equipment. *Наукові праці ВНТУ = Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2015, no. 4, pp. 1–7.

20. Åkesson J., Ekvall J. *Parameter Optimization of a Paper Machine Model*. Paper Presented at Reglermöte. Stockholm, Lund University, 2006. 7 p.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

---

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

Научная статья

УДК 661.123

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-201-212

## Гидролиз гемицеллюлоз древесины при ультранизких концентрациях серной кислоты

**А.В. Бахтиярова**<sup>✉</sup>, *ст. преподаватель*; *ResearcherID: [ABF-8063-2020](https://orcid.org/0000-0002-0480-3156)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0480-3156>*

**С.Д. Пименов**, *аспирант*; *ResearcherID: [AAC-9435-2020](https://orcid.org/0000-0001-6042-0021)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6042-0021>*

**А.И. Сизов**, *канд. техн. наук*; *ResearcherID: [AAI-2030-2020](https://orcid.org/0000-0001-9412-5557)*,

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-5557>*

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; [nyroc@rambler.ru](mailto:nyroc@rambler.ru)<sup>✉</sup>, [chudopim@mail.ru](mailto:chudopim@mail.ru), [sizov.alex@gmail.com](mailto:sizov.alex@gmail.com)

*Поступила в редакцию 06.02.22 / Одобрена после рецензирования 11.05.22 / Принята к печати 14.05.22*

**Аннотация.** Кислотный гидролиз полисахаридов растительных материалов традиционно подразделяют на гидролиз разбавленными и концентрированными кислотами. Такое разделение обусловлено существенным различием в механизме гидролиза полисахаридов. Для разбавленных кислот исследования гидролиза полисахаридов растительных материалов, как правило, лежат в области концентраций минеральных кислот 0,5–10,0 % или касаются автогидролиза без использования минеральных кислот. Каждый из этих способов имеет свои достоинства и недостатки. Гидролиз с использованием разбавленных минеральных кислот отличается значительным расходом реагентов и наличием в гидролизате продуктов распада углеводов. Автогидролиз характеризуется относительно низким выходом моносахаридов, высокими энергозатратами на проведение процесса и образованием большого количества побочных продуктов неуглеводного характера. Методы гидролиза полисахаридов древесных материалов минеральными кислотами в диапазоне концентраций менее 0,5 % не исследованы. Причиной, на наш взгляд, стало утверждение о том, что кислота в процессе гидролиза расходуется (от 5 до 20 г/кг сухого сырья) на нейтрализацию зольных компонентов растительных материалов. Соответственно, при проведении гидролиза низкими концентрациями минеральной кислоты возможны ее полная нейтрализация и переход процесса в режим автогидролиза. Цель работы – проверка эффективности осуществления процесса гидролиза гемицеллюлоз березы при ультранизких (менее 12,5 г/кг абсолютно сухой древесины) расходах серной кислоты для последующего получения ксилита. Исследован процесс гидролиза гемицеллюлоз древесины березы при ультранизких концентрациях серной кислоты. Показана возможность практически полного гидролиза гемицеллюлоз серной кислотой концентрацией 0,10–0,25 %. Процесс гидролиза гемицеллюлоз ультранизкими концентрациями кислоты хорошо описывается реакцией первого порядка. Рассчитанные по экспериментальным данным основные кинетические константы позволяют утверждать, что процесс занимает промежуточное положение между автогидролизом и традиционным гидролизом гемицеллюлоз серной кислотой концентрацией более 0,5 %. Разработанный метод проведения процесса выгодно отличается от известных способов гидролиза гемицеллюлоз низкими расходами серной кислоты (более чем в 5 раз)

и энергетических ресурсов. Гемиллюлозные гидролизаты, полученные в режимах с ультразвуковой концентрацией кислоты, обладают высокой доброкачественностью и могут быть использованы в производстве ксилита.

**Ключевые слова:** гидролиз низкими концентрациями кислоты, константа скорости гидролиза, ксилозный гидролизат, гидролиз гемиллюлоз древесины, гидролиз серной кислоты, производство ксилита

**Для цитирования:** Бахтиярова А.В., Пименов С.Д., Сизов А.И. Гидролиз гемиллюлоз древесины при ультразвуковых концентрациях серной кислоты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 201–212. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-201-212>

Original article

### Hydrolysis of Wood Hemicelluloses at Ultra-Low Sulfuric Acid Concentrations

**Anna V. Bakhtiyarova**<sup>✉</sup>, Senior Lecturer; ResearcherID: [ABF-8063-2020](https://orcid.org/0000-0002-0480-3156),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0480-3156>

**Sergei D. Pimenov**, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAC-9435-2020](https://orcid.org/0000-0001-6042-0021),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6042-0021>

**Alexander I. Sizov**, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAI-2030-2020](https://orcid.org/0000-0001-9412-5557), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-5557>

Saint-Petersburg State Forest Technical University, Institutsky Lane, D. 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; [nyroc@rambler.ru](mailto:nyroc@rambler.ru)<sup>✉</sup>, [chudopim@mail.ru](mailto:chudopim@mail.ru), [sizov.alex@gmail.com](mailto:sizov.alex@gmail.com)

Received on February 06, 2022 / Approved after reviewing May 11, 2022 / Accepted on May 14, 2022

**Abstract.** Studies in the field of hydrolysis of plant polysaccharides are ordinary classified according to protic reactions with diluted or concentrated acids. Such classification is based on the significant difference in the mechanisms of the reactions. The hydrolysis of polysaccharides of plant materials with the diluted acids is indicated by the concentrations of the mineral acids 0.5–10.0 % or happens by acid-free autohydrolysis, without any use of acids. Each of these reactions has considerably different kinetic and temperature-time parameters. They have both advantages and disadvantages. In particular, the hydrolysis using dilute acids is specified by a significant consumption of reagents and the presence of a large amount of carbohydrate degradation products in the hydrolysate. Autohydrolysis is characterized by a relatively low monosaccharide yield, high energy consumption for the process and the formation of many by-products. To date, studies regarding hydrolysis of polysaccharides of plant materials with acids in a concentration range of less than 0.5 % are absent. The reason for the lack of interest in research in this area, in our opinion, was the statement that acid in the process of hydrolysis is spent on the neutralization of ash components of plant materials at a flow rate of 5 to 20 g/kg of dry raw materials. Accordingly, when hydrolysis is carried out with ultra-low concentrations of acid, it is possible to completely neutralize it and switch the hydrolysis process from acid to acid-free autohydrolysis. The purpose of the work was to establish the efficiency of the hydrolysis process at ultra-low acid consumption. A study of the process of hydrolysis of hemicelluloses of birch wood at ultra-low concentrations of sulfuric acid was carried out. The possibility of almost complete hydrolysis of hemicelluloses with sulfuric acid with concentration of 0.10–0.25 % is shown. The process of hydrolysis of hemicelluloses with ultra-low acid concentrations is well described by the first order reaction.



The general kinetic constants are calculated according to the experimental data. They show that the process occupies an intermediate position between acid-free autohydrolysis and traditional hydrolysis of hemicelluloses with sulfuric acid with a concentration of more than 0.5 %. The developed technique is advantageously different from the known methods of hydrolysis of hemicelluloses by low consumption of sulfuric acid (more than 5 times) and energy resources. Hemicellulose hydrolysates obtained by ultra-low acid concentration regimes have high benign properties and can be used in xylitol production.

**Keywords:** hydrolysis by low acid concentrations, hydrolysis rate constant, xylose hydrolysate, hydrolysis of wood hemicelluloses, sulfuric acid

**For citation:** Bakhtiyarova A.V., Pimenov S.D., Sizov A.I. Hydrolysis of Wood Hemicelluloses at Ultra-Low Sulfuric Acid Concentrations. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 1, pp. 201–212. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-201-212>

### Введение

Проблемы ухудшения экологии и истощения ископаемого сырья ставят задачу расширения использования возобновляемого растительного сырья. Одним из перспективных видов растительного сырья является биомасса древесины, в особенности входящие в ее состав полисахариды. В растительной биомассе полисахариды представлены целлюлозой и гемицеллюлозами, которые могут быть источником моносахаридов – потенциального сырья для производства большого спектра ценных продуктов [5]. В настоящее время получение моносахаридов из полисахаридов растительного сырья осуществляют методом гидролиза.

Гидролиз, как правило, проводят в кислой среде, где в результате протонирования воды образуется ион гидроксония – катализатор реакции. Известен процесс «бескислотного» гидролиза гемицеллюлоз растительного сырья, или автогидролиз, его осуществляют без использования каких-либо внешних кислотных реагентов [6, 22]. Гидролиз гемицеллюлоз происходит при температуре 180–220 °С и катализируется уксусной кислотой, которая образуется при отщеплении ацетильных групп ацетилглюкуроноксилаана [16, 19, 23]. Гидролиз уксусной кислотой протекает при очень низкой концентрации иона гидроксония, порядка  $10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup>. Отсюда следует предположение о возможности гидролиза полисахаридов при низких концентрациях сильных минеральных кислот в растворе [1, 7, 11].

Важным элементом любой разработки является выбор наиболее эффективных технологических процессов с минимальным расходом реагентов и энергоресурсов. Для бескислотного способа эффективность процесса не очень высока, так как степень конверсии гемицеллюлоз не превышает 75 %, а гидролизаты преимущественно состоят из олигосахаридов и содержат значительное количество низкомолекулярного лигнина, что в ряде случаев затрудняет дальнейшую переработку [11, 13].

Широкое распространение получил гидролиз гемицеллюлоз растительного сырья разбавленными минеральными кислотами с концентрацией 0,5–1,5 %, протекающий при температурах до 160 °С [15]. Гидролиз разбавленными кислотами, несмотря на более высокую степень конверсии гемицеллюлоз (до 95 %) и доброкачественность гидролизатов, также не отличается высокой эффективностью за счет значительного расхода серной кислоты – более 50 г/кг абсолютно сухой древесины [8].

Из сравнения приведенных выше процессов следует вывод о том, что реальным путем повышения эффективности гидролиза растительного сырья может быть разработка процессов с использованием ультранизких концентраций (расходов) минеральной кислоты. Такой подход был успешно применен для получения микрокристаллической целлюлозы гидролизом беленой целлюлозы на основе бамбука соляной кислотой концентрацией менее 0,1 % с расходом кислоты менее 20 г/кг целлюлозы [24] и при глубоком гидролизе целлюлозы на основе багассы серной кислотой концентрацией менее 0,25 % с расходом кислоты 15–50 г/кг целлюлозы [17].

До настоящего времени считалось, что препятствием для применения ультранизких расходов минеральных кислот при проведении гидролиза гемицеллюлоз растительного сырья может являться нейтрализация части кислоты зольными компонентами древесины [7, 11], в основном представленными щелочными и щелочноземельными металлами (Na, K, Ca, Mg). По данным [7] при гидролизе гемицеллюлоз разбавленной серной кислотой снижение общего количества кислоты составило около 10 г/кг абсолютно сухой древесины березы и 5,0 г/кг абсолютно сухой древесины сосны, а по данным [18] – даже около 20 г/кг абсолютно сухой массы растительного сырья. Соответственно, в случае проведения гидролиза при ультранизких расходах серной кислоты – менее 10 г/кг абсолютно сухой древесины, возможны полная нейтрализация кислоты зольными элементами и переход процесса гидролиза в бескислотный режим.

Однако количественная оценка нейтрализации кислоты зольными элементами растительной биомассы неоднозначна. Например, по данным [17] содержание зольных элементов составляет 0,14–0,34 % от массы абсолютно сухой древесины березы. Такое содержание зольных элементов в растительном сырье даже при условии их полной нейтрализации в процессе гидролиза не объясняет расход серной кислоты более 2,5 г/кг сухой массы растительного сырья – значительно меньше указанного в работах [7, 18]. Несоответствия отмечены также в [12], где показано, что снижение расхода серной кислоты с 50 г/кг до 12,5 г/кг сухой массы не повлияло на скорость гидролиза древесины.

Следует отметить высокий выход сахаров (около 70 % от исходной целлюлозы) при глубоком гидролизе полисахаридов образца древесины *Triplochitong scleroxylon*, взятого после предварительного проведения автогидролиза, ультранизкими концентрациями серной кислоты (до 0,07 %, расход кислоты 15 г/кг сухой древесины) при температуре 210 °С и продолжительности процесса 18 мин [20, 21].

Анализируя приведенные материалы, можно сделать выводы о ряде несоответствий в данных о влиянии зольных элементов растительных материалов на нейтрализацию кислоты в процессе гидролиза полисахаридов и возможности проведения гидролиза древесины при ультранизких концентрациях кислоты, что и стало целью настоящей работы.

#### *Объекты и методы исследования*

В работе использовали измельченную древесину березы (*Betula pendula*) из Ленинградской области, содержание легкогидролизуемых полисахаридов – 25,17 %. В качестве реактивов применяли серную кислоту и гидроксид натрия



(95–98 %) фирмы «Вектон». Гидролиз проводили при периодических условиях в стальных автоклавах вместимостью 100 мл из стали X18H9T, внутрь автоклава вставляли стеклянную пробирку вместимостью 50 мл, в которую загружали 5 г сырья в пересчете на абсолютно сухое вещество и 25 мл раствора кислоты концентрацией 0,10–0,25 % (соотношение жидкость/твердое  $L/S = 5$ ). Полость между автоклавом и пробиркой для улучшения теплопередачи заполняли водой.

Нагрев автоклавов проводили на масляной бане с регулируемой температурой и применением мешалки. Время достижения равновесной температуры внутри автоклава составляло менее 2 мин. Температура поддерживалась с точностью  $\pm 0,5$  К. После выдержки при заданной температуре автоклав извлекали из бани и охлаждали проточной водой. Гидролизатмассу количественно переносили на фильтр и промывали водой для экстракции водорастворимых углеводов и кислоты. Промывку вели до нейтральной реакции экстракта по метилоранжу. Концентрацию кислоты в экстракте определяли кондуктометрическим титрованием с использованием кондуктометра TDS-03.

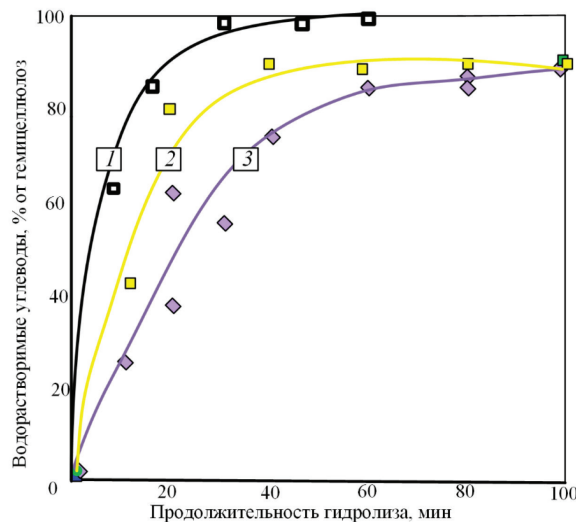
Экстракт анализировали по методикам, приведенным в [2]. Содержание водорастворимых углеводов определяли по редуцирующей способности экстракта после инверсии. Доброкачественность гидролизата рассчитывали по редуцирующим веществам.

#### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 приведена динамика изменения степени конверсии водорастворимых сахаров в процессе гидролиза древесины березы серной кислотой различных концентраций при температуре 170 °С. Как видно из рис. 1, ультранизкие концентрации серной кислоты позволяют провести практически полный гидролиз гемицеллюлоз древесины березы.

Рис. 1. Динамика изменения степени конверсии водорастворимых углеводов в процессе гидролиза древесины березы (температура 170 °С,  $L/S = 5$ ). Исходная концентрация серной кислоты, %: 1 – 0,25; 2 – 0,15; 3 – 0,10

Fig. 1. Dynamics of change of water-soluble carbohydrates during hydrolysis of birch wood (temperature 170 °С,  $L/S = 5$ ). Concentrations of sulfuric acid, in %: 1 – 0.25; 2 – 0.15; 3 – 0.10



Анализ содержания серной кислоты в гидролизате в этих экспериментах показал практически полное отсутствие нейтрализации кислоты зольными элементами древесины березы даже при расходе серной кислоты 5,0 г/кг сухой древесины (табл. 1).

Таблица 1

Результаты гидролиза гемицеллюлоз древесины березы серной кислотой  
различных концентраций

Results of hemicellulose hydrolysis of birch wood with sulfuric acid  
with different concentrations

Исходная концентрация серной кислоты, %	Количество серной кислоты, г/кг сухой массы		Температура, К	Константа скорости реакции, мин <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>
	подано	определено в гидролизате			
0,25	12,5	12,5	443	0,125	0,958
0,15	7,5	7,5		0,064	0,962
0,10	5,0	5,0		0,040	0,989

Примечание: Здесь  $R$  – коэффициент корреляции.

Для гидролиза полисахаридов разбавленной кислотой характерен первый порядок реакции [7]. Реакции первого порядка описываются уравнением (1), в логарифмическом виде оно должно представлять собой линейное уравнение (2):

$$\frac{d[C/C_0]}{dt} = -k[C/C_0]; \quad (1)$$

$$\ln(C/C_0) = -kt, \quad (2)$$

где  $C$  и  $C_0$  – соответственно текущая и начальная концентрации гемицеллюлоз, г/дм<sup>3</sup>;  $k$  – константа скорости реакции гидролиза, мин<sup>-1</sup>;  $t$  – температура, К.

На рис. 2 приведены графики динамики изменения концентрации водорастворимых углеводов по данным рис. 1, представленным в логарифмических координатах.

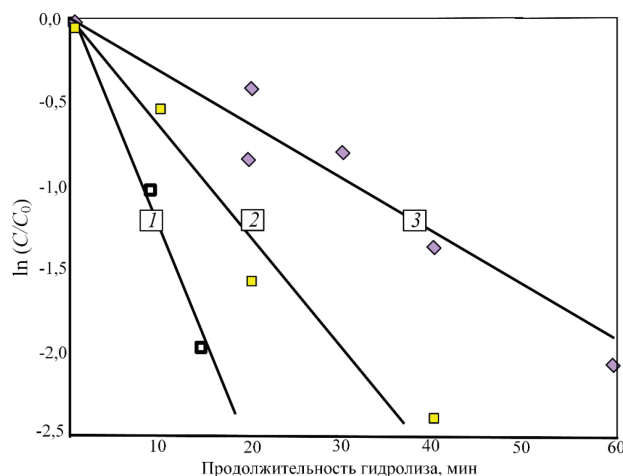


Рис. 2. Изменение логарифма  $C/C_0$  в процессе гидролиза древесины березы (температура 170 °С,  $L/S = 5$ ). Концентрация серной кислоты, %: 1 – 0,25; 2 – 0,15; 3 – 0,10

Fig. 2. Change of logarithm of carbohydrate concentration in process of birch wood hydrolysis (temperature 170 °С,  $L/S = 5$ ). Concentrations of sulfuric acid, in %: 1 – 0.25; 2 – 0.15; 3 – 0.10

Как видно из графика, логарифм степени конверсии гемицеллюлоз линейно изменяется по ходу реакции, что подтверждает первый порядок реакции гидролиза гемицеллюлоз ультранизкими концентрациями серной кислоты.

В табл. 1 приведены расчетные значения констант скорости гидролиза гемицеллюлоз древесины березы при различных исходных концентрациях серной кислоты.

Скорость химической реакции зависит от температуры проведения процесса и в общем виде описывается уравнением Аррениуса. Кислотный гидролиз полисахаридов является каталитическим процессом, где кислота выступает в качестве катализатора. Для таких процессов константа скорости реакции зависит как от температуры, так и от концентрации кислоты [4, 9, 10]. В связи с этим изменение константы скорости гидролиза предложено описывать модифицированным уравнением Аррениуса (3) [24]. В этом уравнении введен дополнительный сомножитель, позволяющий учитывать влияние не только температуры, но и концентрации кислоты:

$$k = k_0 [A]^\alpha \exp\left(-\frac{1000E_a}{RT}\right), \quad (3)$$

где  $k_0$  – предэкспоненциальный фактор, мин<sup>-1</sup>;  $A$  – концентрация кислоты, моль/л;  $\alpha$  – концентрационный индекс серной кислоты;  $E_a$  – энергия активации, кДж/моль;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура, К.

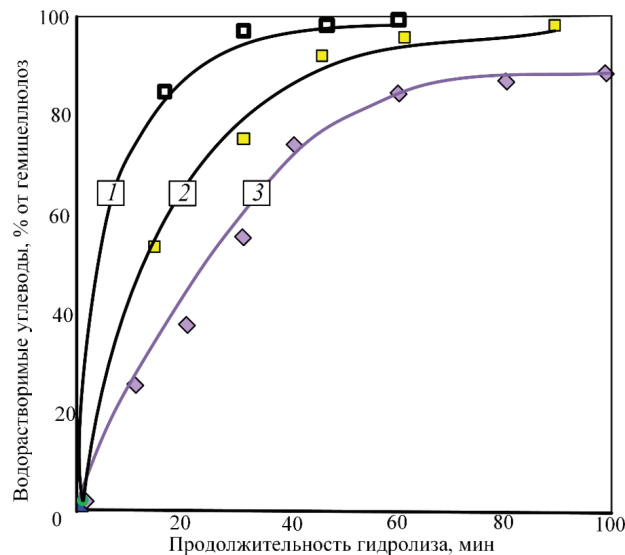
Уравнение (3) после логарифмирования можно представить в линеаризованном виде:

$$-\ln k = \frac{1000E_a}{RT} - \ln k_0 [A]^\alpha. \quad (4)$$

Энергия активации процесса гидролиза может быть рассчитана по уравнению (4), если есть данные по изменению констант скорости гидролиза при различных температурах. На рис. 3 приведена динамика гидролиза древесины березы серной кислотой концентрацией 0,25 % при температурах 443, 433 и 428 К.

Рис. 3. Динамика гидролиза древесины березы серной кислотой концентрацией 0,25 % при различных температурах ( $L/S = 5$ ), К: 1 – 443; 2 – 433; 3 – 428

Fig. 3. Dynamics of water-soluble carbohydrates in the process of wood hydrolysis with sulfuric acid with a concentration of 0.25 % at various temperatures ( $L/S = 5$ ). Temperature, in K: 1 – 443; 2 – 433; 3 – 428



В табл. 2 приведены расчетные значения констант скоростей реакции гидролиза гемицеллюлоз древесины березы серной кислотой концентрацией 0,25 % при различных температурах.

Таблица 2

Расчетные константы скорости гидролиза гемицеллюлоз древесины березы при различных температурах (по данным рис. 3)

Calculated values of hydrolysis rate constants of birch wood hemicelluloses at different temperatures (as per Fig. 3)

Температура, К	Константа скорости реакции, мин <sup>-1</sup>	R <sup>2</sup>
443	0,125	0,958
438	0,071	0,998
433	0,052	0,970

Энергия активации реакции гидролиза гемицеллюлоз древесины березы серной кислотой концентрацией 0,25 % может быть определена по данным табл. 2 графическим методом с использованием уравнения (4) в координатах  $(-\ln k; 1000/RT)$ . График представлен на рис. 4.

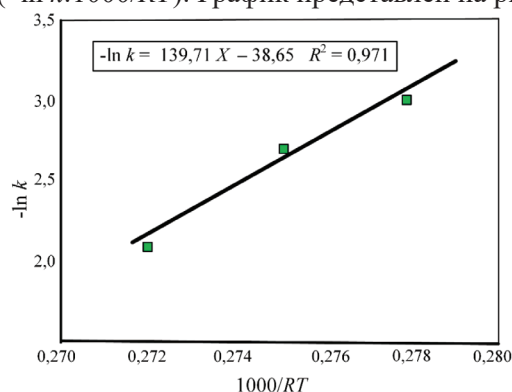


Рис. 4. Зависимость  $-\ln k$  от  $X$  ( $1000/(RT)$ ) для реакции гидролиза гемицеллюлоз древесины березы серной кислотой концентрацией 0,25 %

Fig. 4. Determination of the activation energy of the reaction of hydrolysis for hemicelluloses of birch wood and sulfuric acid with a concentration of 0.25 %

Как видно из графика, линия тренда, построенная по трем константам скорости реакции гидролиза, описывается линейным уравнением с высокой достоверностью аппроксимации (приведены на графике). Расчетная энергия активации реакции гидролиза гемицеллюлоз березы серной кислотой концентрацией 0,25 % по полученному уравнению составляет 139 кДж/моль.

Концентрационный индекс серной кислоты  $\alpha$  может быть найден графическим методом по преобразованному уравнению (4):

$$\ln k = \alpha \cdot \ln [A] + \ln k_0 - \frac{1000E_a}{RT}$$

На рис. 5 приведен график для определения концентрационного индекса серной кислоты в координатах  $\ln k - \ln A$  по данным табл. 1.

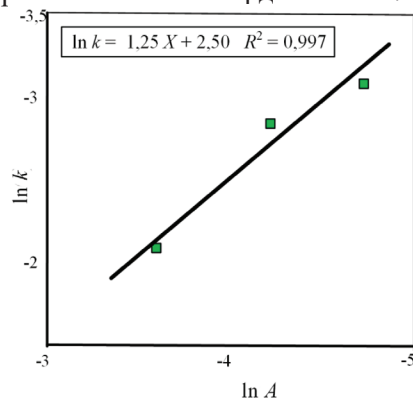


Рис. 5. Зависимость  $\ln k$  от  $\ln A$

Fig. 5. Determination of sulfuric acid concentration index

График показывает, что линия тренда, построенная по трем константам скорости реакции гидролиза при различных концентрациях серной кислоты, характеризуется линейным уравнением с высокой достоверностью аппроксимации (приведены на графике). Расчетный концентрационный индекс реакции гидролиза гемицеллюлоз березы серной кислотой по полученному уравнению равняется 1,25.

Путем подстановки найденных констант скорости реакции и энергии активации в уравнение (4) можно определить предэкспоненциальный фактор  $k_0$  (табл. 3).

Таблица 3

**Предэкспоненциальный фактор гидролиза гемицеллюлоз древесины березы серной кислотой**

**Value of preexponential hydrolysis factor of hemicellulose of birch wood with sulfuric acid**

Температура, К	Константа скорости реакции, мин <sup>-1</sup>	Концентрационный индекс	Энергия активации, кДж/моль	Концентрация кислоты моль/дм <sup>3</sup>	$k_0$
443	0,125	1,25	139	0,0255	$5,26 \cdot 10^{18}$
438	0,071			0,0155	
433	0,052			0,0102	

Найденное значение энергии активации при гидролизе гемицеллюлоз ультранизкими концентрациями серной кислоты близко к энергии активации, определенной другими авторами для концентрации кислоты 0,5–1,5 % – 156 [14] и 167 кДж/моль [24]. Схожие значения энергии активации указывают на равную каталитическую активность иона гидроксония при гидролизе гемицеллюлоз даже в области ультранизких концентраций.

В табл. 4 приведена сравнительная характеристика гидролиза гемицеллюлоз, полученных с применением низких концентраций кислоты и традиционного гидролиза древесины березы серной кислотой в статических условиях.

Таблица 4

**Характеристика гидролиза гемицеллюлоз  
Characteristics of hemicellulose hydrolysis**

Параметр	Гидролиз ультранизкими концентрациями	Традиционный гидролиз разбавленными кислотами по данным [3]
<i>Характеристики процесса</i>		
Концентрация серной кислоты, %	0,10–0,25	0,75
Температура, °С	160–180	125–130
Продолжительность, мин	20–60	180
Гидромодуль $L/S$ , дм <sup>3</sup> /кг	5	4
Расход серной кислоты, г/кг а.с.д.	5–12	30
Выход сахаров, % а.с.д.	23–25	–
<i>Характеристики гидролизата</i>		
Концентрация моносахаридов после инверсии, %	4,5–5,0	5,0–5,8
Концентрация олигосахаридов, %	0,6–0,7	–
Содержание сухих веществ, %	6,0–6,2	6,8–7,7
Доброкачественность, %	75,0–83,0	73,5–78,3
Цветность, ед. Штаммера	60–80	80–100

Примечание: а.с.д. – абсолютно сухая древесина.

Анализ данных табл. 4 показывает, что применение ультранизких концентраций серной кислоты позволяет проводить глубокий гидролиз гемицеллюлоз.

В сравнении с традиционным кислотным гидролизом использование ультранизких концентраций обуславливает снижение расхода серной кислоты и нейтрализующего агента более чем в 5 раз, а высокое качество гемицеллюлозного гидролизата позволяет рекомендовать этот метод проведения процесса для производства ксилита.

#### Выводы

1. Ультранизкие концентрации серной кислоты 0,10–0,25 % позволяют провести практически полный гидролиз гемицеллюлоз древесины березы.

2. При гидролизе гемицеллюлоз древесины березы ультранизкими концентрациями серной кислоты не отмечено снижение ее концентрации в процессе гидролиза.

3. Энергия активации реакции гидролиза гемицеллюлоз ультранизкими концентрациями серной кислоты древесины березы составляет 139 кДж/моль.

4. Гидролизаты, полученные при ультранизких концентрациях серной кислоты, по качеству не уступают гидролизатам, полученным традиционным способом, что позволяет рекомендовать этот вид гидролиза для производства ксилозного раствора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александрова А.Д., Фатеев В.О., Бахтиярова А.В., Сизов А.И. Нейтрализация кислоты в процессе гидролиза древесины // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы Всерос. науч.-техн. конф.-вебинара, Санкт-Петербург, 16–18 июня 2020 г. СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 5–7.

Aleksandrova A.D., Fateyev V.O., Bakhtiyarova A.V., Sizov A.I. Neutralization of Acid in the Process of Wood Hydrolysis. *Forests of Russia: Politics, Industry, Science, Education. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technological Conference-Webinar*. Sankt-Petersburg, Politekh-Press, 2020, pp. 5–7. (In Russ.).

2. Бахтиярова А.В., Денисенко Г.Д. Технология гидролизных и микробиологических производств. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. 44 с.

Bakhtiyarova A.V., Denisenko G.D. *Technology of Hydrolysis and Microbiological Productions*. Sankt Petersburg, SPbFTU Publ., 2018. 44 p. (In Russ.).

3. Выглазов В.В. Технология высококачественного ксилита и других полиолов на основе пентозансодержащего растительного сырья: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2004. 40 с.

Vyglazov V.V. *Technology for High Quality Xylite and Other Polyols Obtained from Pentosan Containing Plant Raw Materials*: Dr. Eng. Sci. Diss. Abs. Sankt-Petersburg, 2004. 40 p. (In Russ.).

4. Григорьева О.Н., Харина М.В. Кинетика реакций кислотного гидролиза целлюлозы и гемицеллюлоз // Вестн. технол. ун-та. 2016. Т. 19, № 11. С. 182–184.

Grigor'yeva O.N., Kharina M.V. Acid Hydrolysis Kinetics of Cellulose and Hemicellulose. *Vestnik of Kazan National Research Technological University*, 2016, vol. 19, no.11, pp. 182–184. (In Russ.).

5. Иванкин А.Н., Зарубина А.Н., Веревкин А.Н., Бабурина М.И. Гидролиз компонентов растительной биомассы как универсальный механизм экобезопасности природных и синтетических материалов // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 5. С. 120–127.



Ivankin A.N., Zarubina A.N., Verevkin A.N., Baburina M.I. Plant Biomass Components Hydrolysis as Universal Mechanism for Eco Safety of Natural and Synthetic Materials. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 120–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-5-120-127>

6. Калейне Д.А., Веверис А.Г., Полманис А.Г., Эриньш П.П. и др. Высокотемпературный автогидролиз древесины. 3. Автогидролиз березовой древесины // Химия древесины. 1990. № 3. С. 101–107.

Kaleyne D.A., Veveris A.G., Polmanis A.G., Erin'sh P.P. et al. High-Temperature Hydrolysis of Wood. 3. Autohydrolysis of Birch Wood. *Khimiya drevesiny*, 1990, no. 3, pp. 101–107. (In Russ.).

7. Корольков И.И. Перколяционный гидролиз растительного сырья. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 272 с.

Korol'kov I.I. *Percolation Hydrolysis of Plant Raw Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 272 p. (In Russ.).

8. Логинова И.В., Харина М.В. Исследование высокотемпературного автогидролиза лигноцеллюлозного сырья // Вестн. технол. ун-та. 2017. Т. 20, № 6. С. 143–145.

Loginova I.V., Kharina M.V. Study of High-Temperature Autohydrolysis of Lignocellulosic Raw Materials. *Vestnik of Kazan National Research Technological University*, 2017, vol. 20, no. 6, pp. 143–145. (In Russ.).

9. Нуртдинов Р.М., Залалдинов Н.С., Валеева Р.Т. Исследование кинетики и оптимизация условий проведения процессов высокотемпературного гидролиза целлюлозы серной кислотой // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16, № 8. С. 126–128.

Nurtdinov R.M., Zalaldinov N.S., Valeyeva R.T. Study of Kinetics and Optimization of Processes Conducting Conditions for High-Temperature Hydrolysis of Cellulose by Sulfuric Acid. *Vestnik of Kazan National Research Technological University*, 2013, vol. 16, no. 8, pp. 126–128. (In Russ.).

10. Олиференко Г.Л., Иванкин А.Н., Жилин Ю.Н., Прошина О.П., Зарубина А.Н., Вострикова Н.Л., Куликовский А.В., Бабурина М.И. Кинетика кислотной трансформации природных полисахаридов древесной биомассы в моносахара для получения кормовых добавок и микробиологических сред // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2017. Т. 21, № 6. С. 61–67.

Oliferenko G.L., Ivankin A.N., Zhilin Yu.N., Proshina O.P., Zarubina A.N., Vostrikova N.L., Kulikovskiy A.V., Baburina M.I. Kinetics of Acid Transformation of Natural Polysaccharides of Wood Biomass to Mono Sugar for Obtaining Feed Additives and Microbiological Media. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 61–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-6-61-67>

11. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 495 с.

Khol'kin Yu.I. *Technology of Hydrolysis Productions*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 495 p. (In Russ.).

12. Чалов Н.В., Козлова Л.В., Лещук А.Е. Кинетика гидролиза полисахаридов целлюлозы сосны 0,25–2,3 %-ной серной кислотой при модуле 2 и температуре 200 °С // Химия древесины. 1982. № 2. С. 97–103.

Chalov N.V., Kozlova L.V., Leshchuk A.E. Kinetics of Hydrolysis of Polysaccharides from Pine Lignocellulose with 0.25–2.3 % Sulfuric Acid at Module 2 and Temperature 200 °C. *Khimiya drevesiny*, 1982, no. 2, pp. 97–103. (In Russ.).

13. Acosta R., Viviescas P., Sandoval M., Nabarlatz D. Autohydrolysis of Sugarcane Bagasse and Empty Fruit Bunch from Oil Palm: Kinetics Model and Analysis of Xylo-Oligosaccharides Yield. *Chemical Engineering Transactions*, vol. 65, 2018. pp. 307–312. <https://doi.org/10.3303/CET1865052>

14. Carrasco F., Roy C. Kinetic Study of Dilute-Acid Prehydrolysis of Xylan-Containing Biomass. *Wood Science and Technology*, 1992, vol. 26, iss. 3, pp. 189–208. <https://doi.org/10.1007/bf00224292>
15. Carvalheiro F., Duarte L.C., Gírio F.M. Hemicellulose Biorefineries: A Review on Biomass Pretreatments. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 2008, vol. 67, pp. 849–864.
16. Garrote G., Domínguez H., Parajó J.C. Autohydrolysis of Corncob: Study of Non-Isothermal Operation for Xylooligosaccharide Production. *Journal of Food Engineering*, vol. 52, iss. 3, pp. 211–218. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00108-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00108-X)
17. Gurgel L.V.A., Marabezi K., Zambom M.D., Curvelo A.A. da S. Dilute Acid Hydrolysis of Sugar Cane Bagasse at High Temperatures: A Kinetic Study Of Cellulose Saccharification and Glucose Decomposition. Part I: Sulfuric Acid as the Catalyst. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, vol. 51, iss. 3, pp. 1173–1185. <https://doi.org/10.1021/ie2025739>
18. Lloyd T.A., Wyman C.E. Predicted Effects of Mineral Neutralization and Bisulfate Formation on Hydrogen Ion Concentration for Dilute Sulfuric Acid Pretreatment. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2004, vol. 115, pp. 1013–1022. <https://doi.org/10.1385/ABAB:115:1-3:1013>
19. Nabarlantz D., Ebringerová A., Montané D. Autohydrolysis of Agricultural By-Products for the Production of Xylooligosaccharides. *Carbohydrate Polymers*, 2007, vol. 69, iss. 1, pp. 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.08.020>
20. Ojumu T.V., AttahDaniel B.E., Betiku E., Solomon B.O. Auto-Hydrolysis of Lignocellulosics Under Extremely Low Sulfuric Acid and High Temperature Conditions in Batch Reactor. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2003, vol. 8, iss. 5, pp. 291–293. <https://doi.org/10.1007/BF02949219>
21. Ojumu T.V., Ogunkunle O.A. Production of Glucose from Lignocellulosic Under Extremely Low Acid and High Temperature in Batch Process, Auto-hydrolysis Approach. *Journal of Applied Sciences*, 2005, vol. 5, iss. 1, pp. 15–17. <https://doi.org/10.3923/jas.2005.15.17>
22. Santucci B.S., Maziero P., Rabelo S.C., Curvelo A.A.S., Pimenta M.T.B. Autohydrolysis of Hemicelluloses from Sugarcane Bagasse During Hydrothermal Pretreatment: A Kinetic Assessment. *Bioenergy Research*, 2015, vol. 8, pp. 1778–1787. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9632-z>
23. Sharma S., Kumar R., Gaur R., Agrawal R., Gupta R.P., Tuli D.K., Das B. Pilot Scale Study on Steam Explosion and Mass Balance for Higher Sugar Recovery from Rice Straw. *Bioresource Technology*, 2015, vol. 175, pp. 350–357. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.112>
24. Zhang Y., Xu Y., Yue X., Dai L., Ni Y. Isolation and Characterization of Microcrystalline Cellulose from Bamboo Pulp Through Extremely Low Acid Hydrolysis. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2019, vol. 39, iss. 4, pp. 242–254. <https://doi.org/10.1080/02773813.2019.1566365>

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

---

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

## ЮБИЛЕЙ ПРОФЕССОРА ФЕДЮКОВА ВЛАДИМИРА ИЛЬИЧА

### Путь от лесничего до профессора

10 января исполнилось 75 лет Владимиру Ильичу Федюкову, кандидату сельскохозяйственных наук, доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой стандартизации, сертификации и товароведения ПГТУ, почетному работнику высшего профессионального образования РФ, заслуженному деятелю науки Республики Марий Эл.

В.И. Федюков родился в д. Торханы Шумерлинского района Чувашской АССР в бедной крестьянской семье. Рано оставшись без отца, участника Великой Отечественной войны, с малых лет познал тяжелый крестьянский труд.

В 1964 г. с отличием и Почвальной грамотой (в то время это было редкостью) окончил Торханскую восьмилетнюю школу. Дальнейшее образование получал в Ходарской средней школе. По результатам вступительных экзаменов в 1966 г. был зачислен на лесохозяйственный факультет Поволжского лесотехнического института (г. Йошкар-Ола).

Еще в студенческие годы благодаря наставнику доценту С.И. Рожнову у В.И. Федюкова появилась тяга к научным исследованиям. Первые результаты этого стремления воплощены в дипломном проекте «Механизация лесокультурных работ в Шумерлинском ЛПХ Чувашской АССР», защищенном на отлично в 1970 г.

Рабочую карьеру В.И. Федюков начал инженером-гидролесомелиоратором в Глазовском мехлесхозе Удмуртии, а через 5 лет был назначен лесничим. Одновременно с исполнением трудовых обязанностей самостоятельно проводил комплексные почвенно-гидрологические, лесобиологические и древесиноведческие исследования на объектах лесосошения, заочно обучаясь в аспирантуре ЛенНИИХ под руководством кандидата сельскохозяйственных наук В.Г. Рубцова. Подобные изыскания осуществлялись в республике впервые – было много спорных вопросов об эффективности мелиорации и ее влиянии на окружающую среду. По результатам семилетних исследований в 1980 г. в ЛТА им. С.М. Кирова состоялась защита кандидатской диссертации «Лесоводственная эффективность гидролесомелиорации ельников Удмуртии».

После 10 лет производственной деятельности жизнь Владимира Ильича круто изменилась. В 1980 г. он был приглашен в Лабораторию лесоведения АН СССР (в дальнейшем – Институт лесоведения РАН) на должность старшего научного сотрудника. Работая в Лаборатории лесоведения, Владимир Ильич внес вклад в подготовку объектов для гидролесомелиоративных исследований на базе Западнодвинского научного стационара.

В 1983 г. Владимир Ильич вернулся в родной вуз и начал научно-педагогическую деятельность, заняв должность старшего преподавателя кафедры гидротермической обработки древесины и древесиноведения. В 1996 г. при поддержке ректора, члена-корреспондента РАЕН Г.С. Ощепкова инициировал открытие в вузе нового для России направления подготовки – стандартизации и сертификации, и до настоящего времени руководит выпускающей по этому направлению кафедрой.

В 1998 г. Владимир Ильич успешно защитил диссертацию на соискание степени доктора технических наук во ВНИИС (Москва), а в 2000 г. получил звание профессора.

Направление научных исследований В.И. Федюкова связано с изучением резонансной формы ели с уникальными акустическими свойствами. В 1990 г. под его руководством открыта единственная в России учебно-научно-производственная лаборатория «Квалиметрия резонансной древесины», которая аттестована Хозрасчетным научным объединением Минвуза РСФСР. Разработаны и внедрены новые неразрушающие способы экспресс-диагностики резонансных и других физико-механических свойств древесины у растущих деревьев на основе ударно-акустических, пьезоэлектрических, вибрационных, ультразвуковых и частотно-амплитудных методов исследования керна.

В.И. Федюков является автором более 130 научных работ и 6 монографий. Научную деятельность он плодотворно совмещает с учебно-методической работой: им написано 12 учебных и учебно-методических пособий, подготовлено 5 кандидатов технических наук.

---