

# ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2025 Том 15 № 1 (57)

- *Экспериментальное использование отходов переработки водорослей при выращивании семян сосны обыкновенной*
- *Декоративные планки с имитацией текстуры дуба из древесины мягких лиственных пород*
- *Влияние хронического радиоактивного загрязнения в условиях Южного Нечерноземья на семенную продуктивность *Pinus sylvestris* L.*



# **ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**Научный журнал  
2025 Том 15 № 1 (57)**

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ)

**Главный редактор**

д.т.н., проф. М.В. Драпалюк

**Заместитель главного редактора**

д.г.н., проф. Н.В. Яковенко

**Состав редакционной коллегии**

- д.с.-х.н., проф., академик РАН Н.Н. Дубенок (Россия)  
д.с.-х.н., гл. н.с., академик РАН К.Н. Кулик (Россия)  
д.с.-х.н., проф., академик РАН А.А. Мартынюк (Россия)  
д.б.н., проф., чл.-корр. РАН А.А. Сирин (Россия) 2012-2023  
д.т.н., проф. Д.Н. Афоничев (Россия)  
д.т.н., проф. Е.В. Агеев (Россия)  
д.т.н., проф. Л.И. Бельчинская (Россия)  
д.ф.-м.н., проф. Н.Н. Матвеев (Россия)  
д.б.н., проф. С.М. Матвеев (Россия)  
д.б.н., проф. А.А. Гусев (Россия)  
к.б.н., проф. К.В. Крутовский (Россия, Германия)  
д.э.н., проф. С.С. Морковина (Россия)  
д-р наук И. Ремеш (Чехия)  
д.т.н., проф. А.М. Цыпук (Россия)  
д.т.н., проф. В.А. Зеликов (Россия)  
д.т.н., проф. О.Н. Бурмистрова (Россия)  
д.т.н., проф. И.В. Григорьев (Россия)  
д.с.-х.н., проф. А.С. Манаенков (Россия)  
д.б.н., проф. В.В. Рубцов (Россия)  
д.т.н., проф. В.С. Сютёв (Россия)  
д.б.н., проф. Н.Н. Харченко (Россия)  
д-р наук, ст. науч. сотрудник  
Клессия Барбоза Мастранджело (Бразилия)  
д-р наук, проф. П. Тылек (Польша)  
д-р наук С.В. Ребко (Беларусь)  
проф. Дингуо Чжоу (КНР)  
д-р наук, проф. А. Маркомини (Италия)  
д-р наук, проф. В. Подразски (Чехия)  
д-р наук, проф. Н. Билир (Турция)  
д-р наук, проф. Я. Седлячик (Словакия)  
д-р наук М. Ахмади-Афзади (Иран)  
д-р наук, проф. В. Иветич (Сербия)  
д-р наук, проф. Кью-Сак Кэнг (Республика Корея)  
д-р наук А. Монтагноли (Италия)  
д-р наук Янг Пэнг (КНР)  
д-р наук, проф. З. Говедар (Босния и Герцеговина)  
д-р наук, проф. А. Хэлуфи (Алжир)  
д-р наук, проф. К. Палагиану (Румыния)

**Технический секретарь**

С.Ю. Крохотина

**Компьютерная верстка**

С.Ю. Крохотина

Журнал зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых  
коммуникаций

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-66384 от 14.07.2016 г.

Материалы настоящего журнала могут быть  
воспроизведены только с письменного разрешения  
редакционной коллегии

РИО ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»  
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8  
телефон (473) 253-72-90  
факс (473) 253-76-51  
e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2025

# ***FORESTRY ENGINEERING***

## ***JOURNAL***

**Scientific journal**  
**2025 Vol. 15 № 1 (57)**

Founder – Federal State Budget Educational Institution of High Education  
«Voronezh State University of Forestry and Technologies  
named after G.F. Morozov» (VSUFT)

### **Editor-in-Chief**

Dr., Prof. M.V. Drapalyuk

### **Deputy Editor-in-Chief**

Dr., Prof. N.V. Yakovenko

### **Members of Editorial Board**

Dr., Prof., RAS Academician N.N. Dubenok (Russia)

Dr., Prof., RAS Academician K.N. Kulik (Russia)

Dr., Prof. RAS Academician A.A. Martynyuk (Russia)

Dr., Prof. A.A. Sirin (Russia) 2012-2023

Dr., Prof. D.N. Afonichev (Russia)

Dr., Prof. E.V. Ageev (Russia)

Dr., Prof. L.I. Belchinskaya (Russia)

Dr., Prof. N.N. Matveev (Russia)

Dr., Prof. S.M. Matveev (Russia)

Dr., Prof. A.A. Gusev (Russia)

Dr0., Prof. K.V. Krutovsky (Russia, Germany)

Dr., Prof. S.S. Morkovina (Russia)

Dr. J. Remeš (Czech Republic)

Dr., Prof. V.A. Zelikov (Russia)

Dr., Prof. A.M. Tsypuk (Russia)

Dr., Prof. P. Tylek (Poland)

Dr., Prof. O.N. Burmistrova (Russia)

Dr., Prof. I.V. Grigoriev (Russia)

Dr., Prof. A.S. Manaenkov (Russia)

Dr., Prof. V.V. Rubtsov (Russia)

Dr., Prof. V.S. Syunev (Russia)

Dr., Prof. N.N. Kharchenko (Russia)

Dr. Clissia Barboza Mastrangelo (Brazil)

Dr. S.V. Rabko (Belarus)

Prof. Zhou Dingguo (PRC)

Dr., prof. A. Marcomini (Italy)

Dr., Prof. V. Podrazsky (Czech Republic)

Dr., Prof. N. Bilir (Turkey)

Dr., Prof. J. Sedliačik (Slovakia)

Dr. M. Ahmadi-Afzadi (Iran)

Dr., Prof. V. Ivetić (Serbia)

Dr., Prof. Kyu-Suk Kang (Republic of Korea)

Dr. A. Montagnoli (Italy)

Dr. Yong Pang (PRC)

Dr., Prof. Z. Govedar (Republic of Srpska/B&H)

Dr., Prof. A. Kheloufi (Algeria)

Dr., Prof. C. Palaghianu (Romania)

### **Technical Secretary**

S.Yu. Krokhotina

### **Typesetting**

S.Yu. Krokhotina

The journal is registered by  
the Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Technology  
and Communications

Registration certificate  
PI № FS77-66384 of 14.07.2016

Materials of this journal may be reproduced only with  
written permission of the editorial board

EPD FSBEI HE «VSUFT»  
394087, Voronezh, Timiryazev str., 8,  
Phone: +7(473) 253-72-90,  
Fax: +7(473) 253-76-51,  
e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© FSBEI HE «VSUFT», 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

**Голядкина И.В., Горбунова Н.С.,  
Шешнищан С.С., Бахтин А.М.,  
Царегородцев А.В.**

Особенности формирования лесной  
подстилки в условиях старовозрастной  
лесной полосы Каменно-степного  
опытного лесничества 6

**Наквасина Е.Н., Никитина М.В.,  
Романов Е.М., Коптев С.В.**

Экспериментальное использование  
отходов переработки водорослей  
при выращивании сеянцев сосны  
обыкновенной 23

**Шешнищан Т.Л., Матвеев С.М.,  
Шешнищан С.С.**

Влияние фитоценоза на пространствен-  
ную изменчивость запасов углерода в  
лесных почвах Центральной лесостепи 38

### ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА.

#### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Акинина Е.В., Елисеев С.Г.,  
Ермолин В.Н.**

Технология формирования текстуры  
древесины с помощью направленного  
изменения ее проницаемости 59

**Глазунова М.Г.**

Образование лигнофенолформальде-  
гидных олигомеров при среднем  
содержании щёлочи в реакционной  
смеси 72

**Лукаш А. А., Пыкин А. А.,  
Романов В.А., Максименко Д.М.,  
Чернышев О. Н.** Декоративные  
планки с имитацией текстуры дуба из  
древесины мягких лиственных пород 91

**Лесотехнический журнал 1/2025**

## CONTENTS

### NATURAL SCIENCES AND FOREST

**Golyadkina I.V., Gorbunova N.S.,  
Sheshnitsan S.S., Bakhtin A.M.,  
Tsaregorodtsev A.V.**

Features of plant litter  
in the conditions of old-age shelterbelt  
in the Kamennaya steppe 6

**Nakvasina E.N., Nikitina M.V.,  
Romanov E.M., Koptev S.V.**

Experimental use of algae processing  
waste in growing of pine seedlings 23

**Shehsnitsan T.L., Matveev S.M.,  
Sheshnitsan S.S.**

Influence of the phytocenosis  
on the spatial variability of carbon  
stocks in forest soils of the Central  
Forest-Steppe 38

### WOOD PROCESSING.

#### CHEMICAL TECHNOLOGIES

**Akinina E.V., Eliseev S.G., Ermolin  
V.N.**

The technology of forming the texture  
of wood by means of a directional  
change in its permeability 59

**Glazunova M.G.**

Formation of lignophenol-formalde-  
hyde oligomers at an average Alkali  
content in the reaction mixture 72

**Lukash A. A., Pykin A.A., Romanov  
V.A., Maksimenko D. M.,  
Chernyshev O.N.** Decorative slats  
with imitation oak texture made of soft  
hardwood 91

3

**ТЕХНОЛОГИИ. МАШИНЫ  
И ОБОРУДОВАНИЕ**

**Посметьев В. И., Посметьев В. В.,  
Савинков М. А., Никонов В. О.,  
Зеликов В. А., Поздняков Е. В.**

Результаты имитационного моделирования рекуперации энергии навесным механизмом трактора с приспособлением для агрегатирования его с лесными дисковыми орудиями 104

**Соколов А. П.**

Оценка эффективности организации транспортных потоков на перевозках древесины 123

**Черник К.Н., Елисеев С.Г.**

Экспериментальные исследования по определению максимального усилия по извлечению сеянцев с закрытой корневой системой из ячейки кассеты 138

**ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО**

**Еналеева-Бандура И.М., Лозовой Д.В., Литвинов Д.Ю., Баранов А.Н.,  
Морковин В.А., Куницкая О.А.**

Графо-аналитическое моделирование дискретно-непрерывных поточных линий лесопромышленных складов 154

**ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ**

**Скок А.В., Скок А.А.,  
Сорокопудов В.Н.**

Влияние хронического радиоактивного загрязнения в условиях Южного Нечерноземья на семенную продуктивность *Pinus sylvestris* L. 167

**TECHNOLOGIES.**

**MACHINERY AND EQUIPMENT**

**Posmetev V. I., Posmetev V. V.,  
Savinkov M. A., Nikonov V. O.,  
Zelikov V. A., Pozdnyakov E. V.**

Results of simulation modeling of energy recovery by a tractor mounted mechanism with a device for aggregating it with forest disk implements 104

**Sokolov A.P.**

Estimation of the supply chains efficiency in wood transportation 123

**Chernik K.N., Eliseev S.G.**

Experimental studies to determine the maximum effort to extract containerized tree seedling from a cassette cell 138

**FOREST ENGINEERING**

**Enaleeva-Bandura I.M., Lozovoy D.V., Litvinov D.Y., Baranov A.N.,  
Morkovin V.A., Kunitskaya O.A.**

Grapho-analytical modeling of discrete continuous production lines of timber warehouses 154

**NATURE MANAGEMENT**

**Skok A.V., Skok A.A.,  
Sorokopudov V.N.**

Influence of chronic radioactive pollution in the conditions of the Southern Non-black earth region on the *Pinus sylvestris* L. seed productivity 167

## ЭКОЛОГИЯ

**Боев В.А., Иеронова В.В.,  
Петухов А.С.**

Экологическое состояние почвенного  
и растительного покрова лесопарка  
им. Ю.А. Гагарина г. Тюмени

188

## ECOLOGY

**Boev V.A., Ieronova V.V.,  
Petukhov A.S.**

Ecological state of soil and vegetation  
cover of Yuri Gagarin Urban Forest in  
Tyumen

188

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/1>

УДК 630\*114.351

## Особенности формирования лесной подстилки в условиях старовозрастной лесной полосы каменно-степного опытного лесничества

Инна В. Голядкина<sup>1</sup>✉, [golyadkina@vgltu.post.ru](mailto:golyadkina@vgltu.post.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4532-3810>

Надежда С. Горбунова<sup>2</sup>, [vilian@list.ru](mailto:vilian@list.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7986-8106>

Сергей С. Шешнищан<sup>1</sup>, [sheshnitsan@gmail.com](mailto:sheshnitsan@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8027-855X>

Андрей М. Бахтин<sup>1</sup>, [bakhtin\\_2019@inbox.ru](mailto:bakhtin_2019@inbox.ru), <https://orcid.org/0009-0003-9267-5901>

Алексей В. Царегородцев<sup>1</sup>, [tsar.ru@gmail.com](mailto:tsar.ru@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0003-6080-3817>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, 394018, Российская Федерация

Интегральным показателем долговременного воздействия лесообразующих пород на почву являются запасы лесной подстилки. В защитных лесных насаждениях запасы подстилок оцениваются в 30658,54 тыс. т., в том числе в лесостепной природной зоне – 11306,76 тыс. т. Цель данной работы – охарактеризовать особенности формирования лесной подстилки в условиях старовозрастного защитного насаждения. Основная полезная лесная полоса № 43 представляет собой смешанное насаждение из дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), клена остролистного (*Acer platanoides* L.) и вяза приземистого (*Ulmus pumila* L.). Подлесок редкий, представлен преимущественно бересклетом бородавчатым (*Euonymus verrucosus* Scop.). Живой напочвенный покров отсутствует. Лесная подстилка исследуемого биоценоза лесной полосы – полнопрофильная и состоит из трех подгоризонтов. В опушечной части лесного массива строение подстилок упрощается и включает гумифицированный подгоризонт лишь фрагментарно. Средняя мощность лесной подстилки в защитной лесной полосе составила  $6 \pm 0,5$  см, в центральной части это значение может достигать до 11 см, при значительной вариабельности в целом ( $V=15-41\%$ ). В подстилке лесной полосы накапливается значительное количество зольных элементов. Зольность составила 21,35%. Общие запасы органического вещества, сосредоточенного в лесной подстилке старовозрастной лесной полосы, изменяются в среднем от 32,6 до 51,1 т/га, в зависимости от микроместообитания «ствол-крона-окно». При этом максимальные значения характерны для приствольных участков. Содержание углерода в лесной подстилке не зависит от типа местообитания (ствол-крона-окно) и составляет в среднем для изучаемого насаждения  $39,18 \pm 1,68\%$ . Соотношение C/N составляет 21, что свидетельствует о лесной подстилке типа модер с замедленным разложением. При этом в подстилке сосредоточено около 6% общих запасов углерода в слое 0-60 см. Полученные авторами данные могут быть использованы в биогеохимическом мониторинге цикла углерода в антропогенных экосистемах Воронежской области.

**Ключевые слова:** лесная подстилка, чернозёмы, Каменная степь, лесная полоса, дуб черешчатый, углерод, Центральная лесостепь

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 123102700029-3 «Биогеохимический мониторинг цикла углерода в природных и антропогенных экосистемах Воронежской области в условиях глобального изменения климата (FZUR-2023-0001)»

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Голядкина И.В. Особенности формирования лесной подстилки в условиях старовозрастной лесной полосы Каменно-степного опытного лесничества / И.В. Голядкина, Н.С. Горбунова, С.С. Шешницан, А.М. Бахтин, Царегородцев А.В. // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 6-22. – *Библиогр.: с. 16-21 (29 назв.)*. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/1>.

*Поступила* 29.11.2024. *Пересмотрена* 03.01.2025. *Принята* 6.02.2025. *Опубликована онлайн* 24.03.2025.

Article

## Features of plant litter in the conditions of old-age shelterbelt in the Kamennaya steppe

Inna V. Golyadkina<sup>1</sup>✉, [golyadkina@vgltu.ru](mailto:golyadkina@vgltu.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-4532-3810>

Nadezhda S. Gorbunova<sup>2</sup>, [vilian@list.ru](mailto:vilian@list.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-7986-8106>

Sergey S. Sheshnitsan<sup>1</sup>, [sheshnitsan@gmail.com](mailto:sheshnitsan@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0002-8027-855X>

Andrey M. Bakhtin<sup>1</sup>, [bakhtin\\_2019@inbox.ru](mailto:bakhtin_2019@inbox.ru),  <https://orcid.org/0009-0003-9267-5901>

Alexei V. Tsaregorodtsev<sup>1</sup>, [tsar.ru@gmail.com](mailto:tsar.ru@gmail.com),  <https://orcid.org/0009-0003-6080-3817>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

<sup>2</sup>Voronezh State University, University square, 1, Voronezh city, 394018, Russian Federation

### Abstract

The integral indicator of long-term effects of forest-forming species on soil is the stock of forest litter. In protective forest shelterbelts, the reserves of litter are estimated at 30 658.54 thousand tons, including in the forest-steppe natural zone – 11 306.76 thousand tons. The aim of this work - to characterize the features of forming forest litter in old-age forest shelterbelt. The object of study is the main forest protection belt № 43. Author of the planting of Morozov G.F., year of planting -1899. The forest belt is a mixed plantation, with the first storey of which takes up the *Quercus robur* L., and *Acer platanoides* L. of the leftmost generation and the *Ulmus pumila* L. form predominantly the second storey. The forest litter of the studied biozone of the forest belt is a full-profile one and consists of three subhorizons. In the forest edge zones, the construction of the plant litter is simplified and includes a humid subsouder only in a fragmentary way. The average capacity of forest litter in the protective forest belt was 6±0.5 cm, in the central part this value can reach 11 cm, with a significant variability (V = 15-41%). The litter of the forest belt is a significant amount of ash. The ash content was 21.35%. The distribution of total carbon and nitrogen is characterized by a clear peak in the forest litter, with further decline in the top mineral deposits and decrease in depth. The C/N ratio is 21, indicating a slow-decomposing forest litter. Total carbon reserves under the forest logging industry are 165 t/ha in 0-30 cm and 272 t/ha in 0-60 cm. The litter contains about 6% of total carbon stocks in a 0-60 cm layer. The data obtained by the authors can be used in biogeochemical monitoring of carbon cycle in anthropogenic ecosystems of Voronezh region.

**Keywords:** *plant litter, Chernozems, Kamennaya steppe, shelterbelt, Quercus robur, carbon, Central Forest Steppe*

**Funding:** publication was prepared as part of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation 123102700029-3 «Biogeochemical monitoring of carbon cycle in natural and anthropogenic ecosystems of the Voronezh region under conditions of global climate change (FZUR-2023-0001)»

**Acknowledgments:** the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Golyadkina I.V., Gorbunova N.S., Sheshnitsan S.S., Bakhtin A. M., Tsaregorodtsev A.V. (2025). Features of plant litter in the conditions of old-age shelterbelt in the kamennaya steppe. Forest Engineering journal, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 6-22 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/1>.

*Received* 29.11.2024. *Revised* 03.01.2025. *Accepted* 6.02.2025. *Published online* 24.03.2025.

## Введение

В настоящее время для достижения целей устойчивого управления почвенными ресурсами (УУПР) особую актуальность приобретают вопросы углеродного земледелия. Одним из важных методов УУПР являются технологии агролесоводства, которые повышают способность сельскохозяйственных систем противостоять климатическим рискам [1]. Лесомелиорация сельскохозяйственных угодий, применяемая для различных природных условий на территории нашей страны на протяжении достаточно долгого периода времени, подтвердила свою эффективность в оптимизации почвенного плодородия, защите пахотных земель от водной эрозии и дефляции. Потенциал защитных лесных насаждений при организации климатически оптимизированного сельского хозяйства еще до конца не изучен.

В своей работе Копчик Г.Н. и соавторы (2023) [2] отмечают важную зависимость между климаторегулирующими функциями лесных экосистем, их способностью к секвестрации и депонированию углерода и почвенной толщой. При этом подчеркивая, что «информация о почвенных пулах углерода, их пространственная изменчивость и временная динамика в лесных экосистемах недостаточна и не сбалансирована». Данный вывод в полной мере может быть применен и к защитным лесным насаждениям, которые с возрастом приближаются к естественным лесным экосистемам [2].

Зональные агролесомелиоративные системы по данным ФНЦ «Агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения» РАН (2017) занимают в Российской Федерации общую площадь более 3 млн. га [3]. Значительная часть данной площади приходится на наиболее уязвимые регионы нашей страны, подверженные рискам глобального

потепления климата – лесостепную и степную зоны. Так, на 2022 год для условий Центрального Черноземья лесомелиоративные системы сформированы на площади около 600 тыс. га [4].

В Центральном Черноземье, одном из ключевых аграрных районов нашей страны, расположен уникальный объект – природный заказник Федерального значения «Каменная степь», который является наглядным примером успешного опыта по созданию лесных насаждений в зоне южной лесостепи. На территории заказника ведутся многолетние научно-исследовательские работы по стратегически важным направлениям: рациональная организация территории для ведения сельского хозяйства в степной засушливой зоне (повышение урожайности сельскохозяйственных культур), генезис

и эволюция черноземов, а также разработка мероприятий по предотвращению их деградации [5,6]. Изменению различных свойств черноземов в зоне мелиоративного влияния лесополос посвящены работы сотрудников кафедры почвоведения и управления земельными ресурсами ВГУ, в том числе и совместно с кафедрой ландшафтной архитектуры и почвоведения ВГЛТУ [7, 8].

Гораздо меньше работ посвящено объемам и интенсивности депонирования углерода биогеоценозами искусственных лесопосадок. В частности, Замолотчиков Д.Г. и др., (2022) [9]; Каганов В.В. (2023) [10] оценивают объемы дополнительного накопления углерода в древостоях Каменной степи в 220,5 т С/га, при практически неизменном запасе углерода почвы для лесных и безлесных участков. По данным других авторов (Чендев Ю. Г. и др., 2020) [11, 12], проводивших исследования лесополос в агроландшафтах ЦЧР, экосистемы полезащитных лесополос участвуют в активном депонировании

нии атмосферного углерода, при этом запасы углерода в почвенном гумусе и лесной фитомассе искусственных насаждений (55-57 лет) в непосредственной близости от заповедных участков луговых степей в Курской, Белгородской и Воронежской областях оцениваются авторами в 128-159 т/га.

Не так много научно-исследовательских работ по секвестрационному потенциалу защитных лесных насаждений за рубежом, основные результаты исследований опубликованы в работах для условий Китая (Zhang K., Su J., 2023), а также Канады и США (Sauer T. J. и др., 2017; Amichev B. Y. и др., 2020) [13-15].

При этом практически во всех вышеперечисленных работах, как отечественных, так и зарубежных достаточно мало внимания уделяется биогеоэкологическому горизонту лесной подстилки в защитных лесных насаждениях. В работе Каганова В. В. и др. (2023) подчеркивается, что углеродный пул подстилки наиболее быстро реагирует на изменения климата. При этом авторы запасы углерода в подстилке участков лесных полос Каменной степи оценивают в 7-7,6 т С/га [10].

Несмотря на значительные площади лесомелиорированных земель, большая часть которых находится в лесостепной, степной и сухостепной зонах Российской Федерации, практически отсутствуют современные научно-исследовательские работы, посвященные изучению детритогенеза в лесоаграрных ландшафтах. Немногочисленные сообщения о результатах исследований лесной подстилки, основанные на изучении отдельных защитных лесных насаждений различного класса возраста и ассортимента древесно-кустарниковых пород свидетельствуют о необходимости развития данного научного направления. Важность подобных исследований обусловлена значительными запасами лесных подстилок в лесных полосах. Так, Кретинин

В.М. (2021) [16] оценивает общие запасы лесных подстилок «в среднем по РФ в 30658,54 тыс. т., в том числе по лесостепной зоне – в 11306,76 тыс. т.».

Кроме того, формирование лесной подстилки является одним из основных почвообразовательных процессов на лесомелиорируемой территории, наряду с накоплением и трансформацией фитомассы. Изучение данных процессов необходимо также для более углубленного понимания приходных и расходных составляющих углеродного баланса в условиях системы защитных лесных насаждений на сельскохозяйственных землях.

Цель работы – охарактеризовать особенности формирования лесной подстилки в условиях старовозрастной лесной полосы №43 в Каменной степи. Для выполнения поставленной цели последовательно решались следующие задачи: описание морфологического строения и мощности лесной подстилки, а также характеристика физико-химических параметров лесной подстилки; оценка накопления органического вещества лесной подстилкой, оценка запасов общего углерода в лесной подстилке и в слое 0-60 см в почве под лесополосой.

### Материалы и методы

*Предмет и объект исследований.* Государственный природный заказник федерального значения «Каменная степь» расположен в Таловском районе Воронежской области на стыке лесостепной и степной зон Российской Федерации.

Объектом исследования является основная полезащитная лесная полоса № 43. Автор посадки Морозов Г.Ф., год посадки – 1899. Постоянная пробная площадь размером 1 га была устроена в лесополосе в 2023 году (рис. 1).



Рисунок 1. Схематическое изображение постоянной пробной площади на плане защитных лесных насаждений. Собственная композиция авторов

Figure 1. Schematic representation of the permanent sample plot on the Map-scheme of Forest Shelterbelts system. Authors' own composition

Выполнено таксационное описание древо-стоя, заложен почвенный разрез, проведено морфогенетическое описание почвенного профиля и отобраны почвенные образцы.

Основная полевая защитная лесная полоса № 43 представляет собой смешанное насаждение из дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), клена остролистного (*Acer platanoides* L.) и вяза приземистого (*Ulmus pumila* L.). Ширина лесной полосы на момент обследования составляла 88 метров. Формула древо-стоя – 5Д4КлО1В. Вертикальная структура древо-стоя представлена двумя ярусами, в первом ярусе – дуб семенного происхождения, во втором ярусе – клен и вяз. Подлесок редкий, представлен преимущественно бересклетом бородавчатым (*Euonymus verrucosus* Scop.). Живой напочвенный покров отсутствует.

Тип почвы – черноземы миграционно-мицелярные карбонатсодержащие среднесильные тяжелосуглинистые на покровных и лессовидных суглинках (Chernozems Chernic (CHch), WRB, 2022).

Название почвы присвоено в соответствии с классификацией почв, изложенной в мировой реферативной базе почвенных ресурсов [17].

Основные таксационные характеристики постоянной пробной площади приведены в таблице 1.

Учитывая, что подстилка является производной от насаждения, интересно проследить динамику изменения породного состава лесной полосы за более чем 100-летний период. В работе Кулаковой Е.Н. и др. (2023) [18] отмечено, что дуб черешчатый сохранил за собой позицию основной породы, клён остролистный от единичных деревьев в составе в 1952 году увеличил свою долю до 40 %. Доля вяза незначительно снизилась, а ясень сравнительно недавно (с 2018 года) полностью выпал из состава насаждения в связи с тем, что полностью был поражён опасным стволовым вредителем ясеневой златкой (*Agrius planipennis*).

Таксационная характеристика лесной полосы № 43 (год таксации – 2023)

Table 1

Inventory of the shelterbelt № 43 (Forest inventory year – 2023)

Порода   Species	Возраст, лет   Age	Высота, м   Height, m	Диаметр, см   Diameter, cm	Запас, м <sup>3</sup> /га   Stock, m <sup>3</sup> / ha	Класс бонитета   Bonitet
Дуб черешчатый   <i>Quercus robur</i> L.	120	28.3	50.7	185	II
Клен остролистный   <i>Acer platanoides</i> L.	75	17.2	17.5	131	
Вяз приземистый   <i>Ulmus pumila</i> L.	120	21.8	28.6	63.5	

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

*Сбор данных.* Исследования и отбор образцов подстилки проводились в середине вегетационного сезона (июль–август) в соответствии с методическими рекомендациями в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» [19]. Пространственную вариабельность при отборе подстилки учитывали, выделяя ряд «ствол–крона–окно».

Лесная подстилка представляет собой биохимически активное органо-минеральное надпочвенное образование с примесью минеральных частиц, привнесенных подстилающей почвой и атмосферной пылью (что особенно характерно для систем защитных лесных полос). В связи с этим при отборе образцов лесной подстилки как можно более тщательно старались отделить её от верхнего слоя почвы. После взвешивания и взятия образцов на влажность, индивидуальные образцы подстилки перемешивались и методом квадратов отбирались смешанные образцы для лабораторного анализа. Определение зольности по ГОСТ 27784-88 «Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв.» [20]. При сухом озолении определялось количество «сырой» золы без вычета минеральных примесей. Определение pH водной и солевой вытяжки лесной подстилки проводили модифицированным методом Гефферта [21]. Этап отстаивания пробы в течение 24 часов был заменен на

3-х часовое встряхивание на орбитальном шейкере ELMI S-3L.A20 с количеством оборотов 350 в минуту и последующей фильтрацией через фильтр белая лента. Определение общего углерода и общего азота было произведено на элементном анализаторе ECS 8024.

Почвенные разрезы закладывались в центральной части лесной полосы на всю глубину почвенного профиля. Для определения плотности почв послойно через каждые 10 см до глубины 60 см был произведен отбор проб пробоотборником ПГ-100 с комплектом режущих колец. В соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы.» [22] была проведена подготовка почвенных проб к анализу. С помощью формулы (1) был произведен пересчет запасов углерода с учетом объемной массы почвы (методические указания Минприроды России от 30.06.2017 N 20-р) [23].

$$S = TE\% \times H \times BD, (1)$$

где S – запас углерода в почве, т / га; TE% – общее содержание углерода в смешанном почвенном образце, %; H – глубина отбора, см; BD – объемная масса почвы, г/см<sup>3</sup>.

*Анализ данных.* Статистическая обработка полученных результатов была произведена с помощью программных пакетов MS Excel 2016 и Statistica 12. Используются статистические параметры среднего арифметического значения и стан-

дартного отклонения, а также однофакторный дисперсионный анализ для оценки достоверности различий между средними значениями.

### Результаты и обсуждение

*1.1 Морфологическое строение и мощность лесной подстилки.* Лесная подстилка исследуемого биоценоза лесной полосы – полнопрофильная и состоит из трех слоев (подгоризонтов). OL-состоит из отдельно побуревших, сохранивших свое анатомическое строение элементов опада текущего года, рыхлый, не сплошной (листья, ветки, генеративные органы и т.д.), сухой. OF – полуразложившиеся рас-

тительные остатки, частично сохранившие свое первоначальное строение, в верхней части подгоризонта средне спрессованный, а ниже сильноспрессованный опад прошлых лет, мицелий грибов. OH – состоит из сравнительно однородной массы гумифицированных остатков, иногда с признаками анатомического строения полуразложившейся коры и веток, свежий, мажущий.

В опушечной части лесного массива строение подстилок упрощается и включает гумифицированный подгоризонт лишь фрагментарно. На рисунке 2 приведен пример отбора монолита лесной подстилки в лесополосе и фрагменты подгоризонтов OF и OH.



Рисунок 2. Монолит лесной подстилки, отобранный с помощью рамки размером 0,25×0,25 м (центральная часть лесной полосы). Собственная композиция авторов.

Figure 2. Forest Litter Monolith selected with frame 0,25×0,25 м (central part of forest shelterbelt). Authors' own composition.

По Богатыреву Л.Г. (2019) [24] «один из наиболее важных показателей лесной подстилки – мощность слоя, зависящая от состава и продуктивности фитоценоза, а также скорости разложения опада». По результатам наших исследований среднее значение мощности слоя лесной подстилки в изучаемой лесополосе составило  $6 \pm 0,5$  см. При

этом в центральной части лесополосы мощность слоя может увеличиваться до 11 см. Коэффициент вариации – 15-41 %, что обусловлено полиморфизмом агролесомелиорируемых почв в ценозах защитных лесных насаждений (ряд, опушка, приствольная зона деревьев и т.д.).

Помимо рассмотренных выше характеристик лесной подстилки, важную информацию о состоя-

нии лесной экосистемы и протекания в них биологического круговорота несут и другие показатели [25], которые отражены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические показатели лесной подстилки в старовозрастной лесной полосе

Table 2

Statistical parameters of forest litter in old-age forest shelterbelt

Параметр   Parameter	M±m	min	max	V, %
Зольность   Ash content, %	21,35±3,38	16,82	25,62	15,8
pH водной вытяжки лесной подстилки   water extract pH of the forest litter	5,94±0,51	5,38	6,85	8,6
pH солевой вытяжки лесной подстилки   salt extract pH of the forest litter	5,76±0,42	5,37	6,47	7,3

Собственные экспериментальные данные Source: own experimental data

В подстилке лесной полосы накапливается значительное количество зольных элементов. Очевидно, что зольность подстилки зависит от типа леса, а также избирательной способности различных растений поглощать элементы минерального питания. Так в суббореальных лесных экосистемах Средней Сибири в березняке ирисово-разнотравном зольность достигала 30,4%, а в березняке разнотравном – 22,6%. На дерново-подзолистых почвах Лесной опытной дачи в Москве зольность сосняка разнотравного и липняка разнотравного составила 7,19 и 13,46 % соответственно [26]. В сосновых экосистемах Марийского Заволжья зольность растительно-детритного покрова варьировала от 4,3 % в сосняках сфагновых до 16,3 % в сосняке лишайниковом [27].

В изучаемом защитном насаждении установлена небольшая кислотность в сочетании с высокой степенью насыщенности основаниями. Регулярный опад древесной растительности обладает подкисляющим эффектом, который снижает pH в верхних горизонтах (по сравнению с пахотными участками) до значения 5,94 ед. Вниз по профилю отмечается очень постепенное увеличение pH в сторону подщелачивания, благодаря влиянию карбонатных почвообразующих пород. Карбонатные новообразования отмечаются на глубине 60-70 см в виде пропитки

(pH = 7,98), а на глубине залегания почвообразующих пород (100-110 см) диагностируются в форме обильного псевдомицелия.

*1.2 Накопление органического вещества в лесной подстилке.* Напрямую с мощностью лесной подстилки связаны запасы органического вещества, сосредоточенного в лесной подстилке. Общие запасы органического вещества, сосредоточенного в лесной подстилке старовозрастной лесной полосы изменяются в среднем от 32,6 до 51,1 т/га, в зависимости от микроместообитания «ствол-крона-окно». При этом максимальные значения характерны для приствольных участков. В результате обработки полученных результатов, нами не было выявлено статистически подтвержденных различий в запасах подстилки в зависимости от фитогенного поля деревьев-эдификаторов в теневом древостое лесополосы.

Учитывая, разницу в мощности лесной подстилки, которую мы зафиксировали в ходе полевых наблюдений, в дальнейшей работе необходимо оценить накопление органического вещества в лесной подстилке в зависимости от строения лесной полосы и преобладающего направления ветров (опушка с подветренной и заветренной сторон, центральная часть). В более ранних работах уже встречаются

указания на зависимость распределения древесного опада и ориентации лесной полосы в пространстве. На ярко выраженную пространственную дифференциацию почвенных свойств от центра лесополосы к ее краям также указывает ряд авторов [28]. Также, Чевердин Ю.И. и др. (2023) [6], рассматривая две лесные полосы различной ландшафтной принадлежности – лесная полоса № 40 (дуб черешчатый, клен остролистный, 120 лет) на водоразделе и лесная полоса № 72 (ясень обыкновенный, дуб черешчатый, 115 лет) на склоне, отмечают различия в характере формирования и накопления листового опада в различных частях лесных полос.

Тунякин В.Д. и соавторы (2022) [28] на примере полевозащитной лесополосы №226 (58 лет), заложенной гнездовым способом из дуба черешчатого приводят следующие данные: общий запас подстилки составляет от 14,2 т/га, из них твердая фракция (ветки, кора, желуди) составляет 10,52 т/га, а рыхлая фракция (листья) –3,58 т/га. При этом авторы отмечают, что в центре полосы (под материнским древостоем) твердого опада в 2,6 раза больше, чем в опушечных зонах.

Средние величины запасов, рассчитанные нами для старовозрастной лесной полосы №43 выходят за пределы диапазона значений, описанных другими авторами [6, 28]. По историческим литературным данным эта цифра варьирует от 25 до 34 т/га, хотя в более ранних работах в 80-летних дубовых защитных лесонасаждениях запасы подстилки достигали 40 т/га. Это может быть связано с различным породным составом защитных лесных насаждений, возрастом, сезонностью, а также особенно-

стями отбора лесной подстилки (в данной работе отбор был произведен преимущественно в центральной части лесной полосы, причем максимальные значения полученного нами диапазона, характерны для приствольных пространств).

Кроме того, полученные нами данные по запасу органического вещества в детрите лесной полосы значительно превышают аналогичные показатели для дубрав лесостепной зоны [29]. Если сравнивать запасы лесной подстилки в старовозрастной дубовой лесной полосе с запасом лесных подстилок в зональных травянистых дубравах, то очевидно, что в условиях лесополосы протекает процесс накопления лесной подстилки, и выражается это в значительной мощности и спрессованности горизонта. В региональных же лесных сообществах с преобладанием дуба лесная подстилка имеет сравнительно небольшие сроки разложения и с возрастом не накапливается. Это подтверждает положение о том, что под пологом лесной растительности в Каменной степи формируются интразональные биоклиматические условия.

*1.3 Содержание общего углерода в верхней части почвенного профиля лесной полосы.* Черноземы миграционно-мицелярные Каменной степи формируются на обогащенных с точки зрения минералогического состава покровных и лессовидных карбонатных суглинках, и глинах. Высокобуферные почвообразующие породы послужили образованию плодородных, с высоким содержанием гумуса черноземных почв. Полученные аналитические данные свидетельствуют о том, что почвы под лесополосой относятся к сильно гумусированным. Содержание гумуса в них достигает 10,67 %.

Профильное распределение общего углерода и азота

Table 3

The profile of total carbon and nitrogen

Слой   Layer	Мощность слоя/ глубина залегания, см   Layer strength/ depth of deposit, cm	Общий С*, %   Total C, %	Общий N*, %   Total N, %	C:N
0	Лесная подстилка   Forest litter	39,18±1,68	1,84±0,12	21
1	10/0-10	6,19±0,02	0,41±0,01	15
2	10/10-20	5,08±0,02	0,27±0,01	19
3	10/20-30	4,77±0,02	0,23±0,01	21
4	10/30-40	3,52±0,01	0,15±0,01	23
5	10/40-50	2,7±0,01	0,1±0,01	27
6	10/50-60	2,69±0,01	0,08±0,01	35

\*Примечание: М – среднее значение, m – стандартное отклонение. Собственные экспериментальные данные М – mean value, m – standard deviation. Source: own experimental data

Лесная подстилка обогащена содержанием общего углерода и азота, что в свою очередь влияет на накопление элементов в минеральных горизонтах исследуемых черноземов. Профильное распределение элементов характеризуется явно выраженным максимумом верхнем 0-10 см слое и дальнейшим убыванием с глубиной (таблица 3). Соотношение C/N составляет 21, что свидетельствует о лесной подстилке типа модер с замедленным разложением.

Содержание углерода в лесной подстилке не зависит от типа местообитания (ствол-крона-окно) и составляет в среднем для лесной полосы

39,18±1,68 %. В руководящих указаниях межправительственной группы экспертов по изменению климата для расчета запасов углерода в лесной подстилке предлагается типовой коэффициент равный 0,37. Несмотря на вполне удовлетворительное совпадение при подсчетах запасов углерода в лесной подстилке разница в значениях может доходить до 1 т С/га.

Под лесополосой запасы общего углерода в слое 0-30 см составляют 165 т/га, а в слое 0-60 – 272 т/га (рисунок 3).

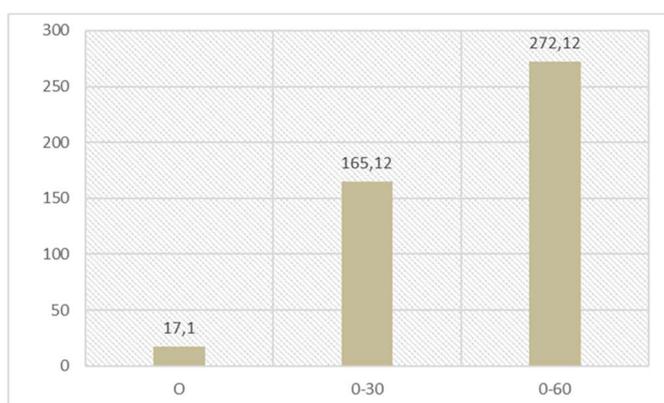


Рисунок 3. Запасы общего С в подстилке и в слое почв 0-60 см (т/га)

Figure 3. Stock of total C in litter and soil 0-60 cm (t/ha)

Источник: собственные вычисления авторов Source: own calculations

При этом в подстилке сосредоточено около 6 % общих запасов углерода в слое 0-60 см. В целом, черноземы Каменной степи имеют сравнительно

большие запасы общего углерода и гумуса, которые определяют не только положительные химические, физические и физико-химические свойства этих

почв, но и их экологические функции, в том числе устойчивость к антропогенному воздействию.

### Выводы

1. В данной работе на примере старовозрастной лесной полосы, расположенной в одном из ключевых аграрных районов нашей страны, предпринята попытка охарактеризовать долговременное воздействие лесообразующих пород на почву. Интегральным показателем подобного воздействия, характеризующим биологический круговорот в экосистеме защитных лесных насаждений, являются запасы лесной подстилки.

2. Лесная подстилка исследуемого биоценоза лесной полосы – полнопрофильная и состоит из трех подгоризонтов. В опушечной части лесного массива строение подстилок упрощается и включает гумифицированный подгоризонт лишь фрагментарно. Средняя мощность лесной подстилки в защитной лесной полосе составила  $6 \pm 0,5$  см, в центральной части это значение может достигать до 11 см, при значительной вариабельности в целом ( $V=15-41$  %). В подстилке лесной полосы накапливается значительное количество зольных элементов. Зольность составила 21,35 %.

3. При изучении лесной подстилки не было выявлено статистически значимых различий в запасах органического вещества в зависимости от положения «ствол – крона – окно».

В дальнейшей работе необходимо произвести сравнении мощности и запасов органического вещества в лесной подстилке учитывая зональность внутри лесной полосы, выделяя ряд «наветренная опушка – центральная (осевая) часть – заветренная опушка».

4. Профильное распределение общего углерода и азота характеризуется явно выраженным максимумом в подстилке с дальнейшим снижением в верхних минеральных горизонтах и убыванием с глубиной. Соотношение C/N составляет 21, что свидетельствует о лесной подстилке типа модер с замедленным разложением.

5. Под лесополосой запасы общего углерода в слое 0-30 см составляют 165 т/га, а в слое 0-60 – 272 т/га. При этом в подстилке сосредоточено около 6 % общих запасов углерода в слое 0-60 см.

6. Полученные авторами данные, могут быть использованы в биогеохимическом мониторинге цикла углерода в антропогенных экосистемах Воронежской области. В перспективе работы по оценке экосистемного пула мертвого органического вещества в защитных лесных насаждениях будут расширены и включают, помимо полезащитных лесных полос, полосы различного назначения и конструкции.

### Список литературы

1. Кулик К.Н., Беляев А.И., Пугачева А.М., Зыкова А.А. Глобальные проекты агролесомелиорации и их реализация. Вестник Российской академии наук. – 2024. – Т. 94 (1). – С.55-65. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587324010071>.
2. Копчик Г.Н., Копчик С.В., Куприянова Ю.В., Кадулин М.С., Смирнова И.Е. Оценка запасов углерода в почвах лесных экосистем как основа мониторинга климатически активных веществ. Почвоведение. – 2023. – № 12. – С.1686-1702. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X23601329>.
3. Рулев А.С., Рулев Г.А. Эколого-экономические аспекты опустынивания земель. Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 158–169. DOI: <https://doi.org/10.15688/ek.jvolsu.2019.3.14>.
4. Михин В.И., Михина Е.А. Агролесоводство в условиях Центральной лесостепи России. Успехи современного естествознания. - 2022. - №12. - С. 212-216. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37973>
5. Турусов В.И., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Титова Т.В. Изменения физических свойств черноземов сегрегационных в агролесоландшафтах центрального Черноземья. Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2020. – №4 (376). – С. 77 - 94. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43935957>.

6. Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Титова Т.В. Изменение показателей эффективного плодородия почв Каменной степи под влиянием лесных полос различной ландшафтной принадлежности. *Агрохимия*. – 2023. – № 9. – С. 3 – 13. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188123090041>.
7. Горбунова Н. С., Шешнищан С.С., Тихонова Е.Н., Куликова Е.В. Особенности трансформации углерода органических соединений при различном сельскохозяйственном использовании в условиях Каменной степи. Актуальные проблемы землеустройства, кадастра и природообустройства: материалы VI международной научно-практической конференции факультета землеустройства и кадастров ВГАУ. Воронеж. – 2024. – С.208-213. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=70648225>.
8. Тихонова Е.Н., Горбунова Н.С., Шешнищан С.С., Одноралов Г.А. Агроэкологическая характеристика черноземов каменной степи: влияние растительных сообществ и распашки. *Лесотехнический журнал*. – 2023. – Т. 13. 3(51). – С. 236-248. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/16>.
9. Замолодчиков Д.Г., Каганов В.В., Мостовая А.С. Влияние лесных посадок на эмиссию диоксида углерода из почвы в Поволжье и Подонье. *Лесоведение*. – 2022. – № 4. С. 339-350. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114822040118>.
10. Каганов В.В., Замолодчиков Д.Г., Мостовая А.С. Влияние климата на запасы углерода фитомассы и подстилки в лесных насаждениях юга Европейской России. *Лесоведение*. – 2023. – №5. – С. 486-501. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114823050030>
11. Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г. Влияние полезащитных лесных насаждений на локальное разнообразие почв (Белгородская область). *Почвоведение*. – 2020. – № 9. С. 1041-1052. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43794354>
12. Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Лукин С.В., Соэр Т.Д., Заздравных Е.А., Белеванцев В.Г., Смирнова М.А. Изменение лесостепных черноземов под влиянием лесополос на юге Среднерусской возвышенности. *Почвоведение*. – 2020. – № 8. – С. 934-947. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X20080031>
13. Amichev B.Y., Laroque C.P., Van Rees, K.C.J. Shelterbelt removals in Saskatchewan, Canada: implications for long-term carbon sequestration. *Agroforest Syst* 94. 2020. P. 1665–1680. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00484-8>
14. Zhang K., Jianlan S. Carbon Storage of Shelterbelts in Yunnan Province and Countermeasures for Increasing Carbon Sinks. *E3S Web Conf.* 423. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342302003>
15. Sauer T.J., Cambardella C.A., Brandle R.B. Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt. *Agrofor. Syst.* 2007. 71. P. 163 – 174. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9072-7>
16. Кретьинин В.М. Агролесоводство. Волгоград: ФНИЦ агроэкологии РАН. – 2021. – 268 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qlacap>
17. Мировая реферативная база почвенных ресурсов. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и составления легенд почвенных карт: пер. с англ. Софии Фортовой. Науч. ред. пер. М.И. Герасимовой, П.В. Красильникова. Москва. – 2024. – 248 с. URL: <https://doi.org/10.29003/m4174.978-5-317-07235-3>
18. Кулакова Е. Н., Шешнищан С. С., Кулаков В. Ю., Карташова Н.П., Иркоцкий Э.Р. Тенденции смены породного состава лесомелиоративных насаждений Каменной степи (на примере вековой лесной полосы Г.Ф. Морозова). *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2023. – 192. – С. 69-82. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-192-006>
19. Методические рекомендации наземной оценки количественных и качественных характеристик лесов на сети тестовых полигонов в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИПГЗ) в части разработки системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах. Федеральное агентство лесного хозяйства РФ.

ФГБУ «Рослесинфорг». Москва. – 2023. – 42 с. URL: <https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/07/metodika-vyborochnoj-taksaczii-putyom-zakladki-krugovyh-ploshhadok.pdf>

20. ГОСТ 27784-88 Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв: дата введения 1988-07-25. – Изд. официальное. – Москва. 1994. URL: [https://ros-gosts.ru/file/gost/13/080/gost\\_27784-88.pdf](https://ros-gosts.ru/file/gost/13/080/gost_27784-88.pdf)

21. Geffert A., Geffertova J., Dudiak M. Direct Method of Measuring the pH Value of Wood. Forests. 2019. DOI: <https://doi.org/10.852.10.3390/f10100852>

22. ГОСТ 17.4.4.02-2017 Охрана природы. Почвы Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: введ. впервые: дата введения 2019-01-01. – Изд. официальное. – Москва. 2017. URL: [https://ros-gosts.ru/file/gost/13/080/gost\\_17.4.4.02-2017.pdf](https://ros-gosts.ru/file/gost/13/080/gost_17.4.4.02-2017.pdf)

23. Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов, утвержденные распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 №20-р. 117 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293723/4293723135.pdf>

24. Богатырёв Л.Г., Демаков Ю.П., Исаев А.В., Шарафутдинов Р.Н., Бенедиктова А.И., Земсков Ф.И. Структурно-функциональная организация подстилок в борах Марийского Заволжья. Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2019. – № 1. – С. 3-9. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36922214>

25. Berg B., McClaugherty C. Plant Litter, 4th ed. Switzerland. Cham: Springer. 2020. 332 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-59631-6>

26. Мамонтов В.Г., Мостовая А.С. Элементный состав лесных подстилок дерновоподзолистых почв пробных площадей Лесной опытной дачи. АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. URL: [https://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/2/st\\_225.pdf](https://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/2/st_225.pdf)

27. Телеснина В.М., Подвезенная М.А., Сорокин А.С., Мешалкина Ю.Л. Оценка биомассы хвойно-лиственных лесов на примере УОПЭЦ МГУ «Чашниково». Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2024. – № 2. – С. 37-45. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-37-45>

28. Тунякин В.Д., Рыбалкина Н.В., Шеншин Л.М. Лесообразовательный процесс в предельно узкой защитной лесной полосе. Лесотехнический журнал. 2022. – Т. 12. № 2 (46). – С. 56 -67. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/5>

29. Одноралов Г.А., Тихонова Е.Н., Голядкина И.В., Малинина Т.А. Оценка биологической продуктивности лесной среды в условиях урбанизации (на примере Воронежской нагорной дубравы). Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 2(374). – С. 60-72. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-60-72>

### References

1. Kulik K.N., Belyaev A.I., Pugacheva A.M., Zyкова A.A. *Global'nye proekty agrolesomelioracii i ih realizaciya* [Global agroforestry projects and their implementation]. Vestnik Rossijskoj akademii nauk = Herald of the Russian Academy of Sciences. 2024. 94. 1: 55-65. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587324010071>

2. Kopcik G.N., Kopcik S.V., Kupriyanova Yu.V. [i dr.]. *Ocenka zapasov ugleroda v pochvah lesnyh ekosistem kak osnova monitoringa klimaticheski aktivnyh veshchestv*. [Estimation of Carbon Stocks in Soils of Forest Ecosystems as a Basis for Monitoring Climatically Active Substances]. Pochvovedenie = Eur. Soil. Sci. 2023. 12 :1686-1702. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X23601329>

3. Rulev A.S., Rulev G.A. *Ekologo-ekonomicheskie aspekty opustynivaniya zemel'* [Ecological and Economic Aspects of Land Desertification]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika =Journal of Volgograd State University. Economics. 2019. 21 (3):158-169. (in Russ). DOI: <https://doi.org/10.15688/ek.jvolsu.2019.3.14>

4. Mihin V.I., Mihina E.A. *Agrolesovodstvo v usloviyah Central'noj lesostepi Rossii* [Agroforestry in the conditions of the Central Forest-steppe of Russia]. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Modern science success. 2022. 12: 212-216. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37973>

5. Turusov V.I., Cheverdin Yu.I., Bespalov V.A., Titova T.V. *Izmeneniya fizicheskikh svoystv chernozemov segregacionnyh v agrolesolandshaftah central'nogo Chernozem'ya*. [Changes in the physical properties of segregational Chernozems in agroforest landscapes of the Central chernozem region]. *Lesnoj zhurnal = Forestry Journal*. 2020. 4 (376) :77 - 94. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43935957>
6. Cheverdin Yu.I., Bespalov V.A., Titova T.V. *Izmenenie pokazatelej effektivnogo plodorodiya pochv Kamennoj stepi pod vliyaniem lesnyh polos razlichnoj landshaftnoj prinadlezhnosti*. [Changes in the Indicators of Effective Soil Fertility of the Stone Steppe under the Influence of Forest Strips of Various Landscape Accessories]. *Agrokhimiya = Agrochemistry*. 2023. 9 :3 – 13. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188123090041>
7. Gorbunova N.S., Sheshnican S.S., Tihonova E.N., Kulikova E.V. *Osobennosti transformacii ugleroda organicheskikh soedinenij pri razlichnom sel'skohozyajstvennom ispol'zovanii v usloviyah Kamennoj stepi*. [Particularities of soil organic carbon transformation under different agricultural use in the conditions of Kamennaya steppe]. *Materialy VI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii fakul'teta zemleustrojstva i kadastrav VGAV = Materials of the VI International Scientific and Practical Conference of the Faculty of Land Management and Cadastre of the VSAU*. 2024. 208-213. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=70648225>
8. Tihonova E.N., Gorbunova N.S., Sheshnican S.S., Odnoralov G.A. *Agroekologicheskaya harakteristika chernozemov kamennoj stepi: vliyanie rastitel'nyh soobshchestv i raspashki*. [Agro-ecological characterization of chernozems of the Kamennaya steppe: the impact of vegetation and tillage]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal*. 2023. T. 13. 3(51) : 236-248. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/16>
9. Zamolodchikov D.G., Kaganov V.V., Mostovaya A.S. *Vliyanie lesnyh posadok na emissiyu dioksida ugleroda iz pochvy v Povolzh'e i Podon'e*. [Forest plantations affect carbon dioxide emission from soils in Volga and Don region]. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2022. 4 :339-350. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114822040118>
10. Kaganov V.V., Zamolodchikov D.G., Mostovaya A.S. *Vliyanie klimata na zapasy ugleroda fitomassy i podstilki v lesnyh nasazhdeniyah yuga Evropejskoj Rossii*. [Climate Affecting the Carbon, Phytomass and Litter Stocks in Forest Stans of the South of the European Russia]. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2023. 5: 486-501. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114823050030>
11. Smirnova M.A., Gennadiev A.N., Chendev Yu.G., Kovach R.G. *Vliyanie polezashchitnyh lesnyh nasazhdenij na lokal'noe raznoobrazie pochv (Belgorodskaya oblast')* [Influence of forest shelterbelts on local pedodiversity (Belgorod oblast)]. *Pochvovedenie. = Eur. Soil Sci*. 2020. 9:1041-1052. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43794354>
12. Chendev Yu. G., Gennadiev A. N., Lukin S. V., Soer T. D., Zazdravnyh E. A., Belevancev V. G., Smirnova M. A. *Izmenenie lesostepnyh chernozemov pod vliyaniem lesopolos na yuge Srednerusskoj vozvys'hennosti*. [Change of forest-steppe Chernozems under the influence of shelterbelts in the south of the Central Russian upland]. *Pochvovedenie. = Eur. Soil Sci*. 2020. 8 :934-947. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X20080031>
13. Amichev B.Y., Laroque C.P. Van Rees, K.C.J. *Shelterbelt removals in Saskatchewan, Canada: implications for long-term carbon sequestration*. *Agroforest Syst* 94. 2020; 1665–1680 pp. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00484-8>
14. Zhang K., Jianlan S. *Carbon Storage of Shelterbelts in Yunnan Province and Countermeasures for Increasing Carbon Sinks*. *E3S Web Conf*. 423. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342302003>
15. Sauer T.J., Cambardella C.A., Brandle R.B. *Soil carbon and tree litter dynamics in a red cedar-scotch pine shelterbelt*. *Agrofor. Syst*. 2007; 71:163 – 174. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9072-7>
16. Kretinin V. M. *Agrolesovodstvo* [Agroforestry]. Volgograd: FNC agroekologii RAN = FSC of Agroecology RAS. 2021. 268 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qlacap>
17. Mirovaya referativnaya baza pochvennyh resursov. *Mezhdunarodnaya sistema pochvennoj klassifikacii dlya diagnostiki pochv i sostavleniya legend pochvennyh kart : per. s angl. Sofii Fortovoj. Nauch. red. per. M.I. Gerasimovoj*,

P.V. Krasil'nikova. [World Soil Resource Reference Database. International Soil Classification System for Soil Diagnostics and Soil Map Legends]. 2024. 248 p. (In Russ.). URL: <https://doi.org/10.29003/m4174.978-5-317-07235-3>

18. Kulakova E. N., Sheshnican S. S., Kulakov V. Yu. [i dr.]. *Tendencii smeny porodnogo sostava lesno-meliorativnyh nasazhdenij KamЕННОj stepi (na primere vekovoj lesnoj polosy G.F. Morozova)*. [Trends of changes in tree species composition of forest shelterbelts in stone steppes: a case study of G.F. Morozov's 100-year-old forest shelterbelt]. *Polytematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic online electronic scientific journal of Kuban state agrarian University*. 2023. 192: 69-82. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-192-006>

19. *Metodicheskie rekomendacii nazemnoj ocenki kolichestvennyh i kachestvennyh harakteristik lesov na seti testovyh poligonov v ramkah realizacii vazhnejshogo innovacionnogo proekta gosudarstvennogo znacheniya «Edinaya nacional'naya sistema monitoringa klimaticheskij aktivnyh veshchestv» (VIPGZ) v chasti razrabotki sistemy nazemnogo i distancionnogo monitoringa pulov ugleroda i potokov parnikovyh gazov na territorii Rossijskoj Federacii, sozdaniya sistemy ucheta dannyh o potokah klimaticheskij aktivnyh veshchestv i byudzhet ugleroda v lesah i drugih nazemnyh ekologicheskij sistemah. Federal'noe agentstvo lesnogo hozyajstva RF*. [Methodological recommendations for the ground assessment of quantitative and qualitative characteristics of forests on test-firing networks in the framework of implementation of a major innovative project of state importance «Unified national system for monitoring climate-active substances». To develop a system for the ground and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas flows in the territory of the Russian Federation, establishing a system for recording data on climate-active substance flows and carbon budget in forests and other terrestrial ecological systems. Federal Forestry Agency of the RF. FGBU «Roslesinform»]. 2023. 42 p. (In Russ.). URL: <https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/07/metodika-vyborochnoj-taksaczii-putyom-zakladki-krugovyh-ploshhadok.pdf>

20. GOST 27784-1988 *Pochvy. Metod opredeleniya zol'nosti torfyanyh i otorfovannyh gorizontov pochv* [Soils. Method for determination of ash content in peat and peat-containing soil horizons]. Moscow. 1994. (In Russ.). URL: [https://rosgosts.ru/file/gost/13/080/gost\\_27784-88.pdf](https://rosgosts.ru/file/gost/13/080/gost_27784-88.pdf)

21. Geffert A., Geffertova J., Dudiak M. *Direct Method of Measuring the pH Value of Wood*. Forests. 2019; DOI: <https://doi.org/10.852.10.3390/fl10100852>

22. GOST 17.4.4.02-2017 *Ohrana prirody. Pochvy Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza* [Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of soil for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow. 2017. (In Russ.). URL: [https://rosgosts.ru/file/gost/13/080/gost\\_17.4.4.02-2017.pdf](https://rosgosts.ru/file/gost/13/080/gost_17.4.4.02-2017.pdf)

23. *Metodicheskie ukazaniya po kolichestvennomu opredeleniyu ob'ema pogloshcheniya parnikovyh gazov, utverzhdennye rasporyazheniem Minprirody Rossii ot 30.06.2017 №20-r* [Methodological guidelines for the quantitative determination of greenhouse gas absorption, approved by the Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated 30.06.2017 №20-r]. 117 p. (In Russ.). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293723/4293723135.pdf>

24. Bogatyryov L. G., Demakov Yu. P., Isaev A. V., Sharafutdinov R. N., Benediktova A. I., Zemskov F. I. *Strukturno-funkcional'naya organizaciya podstilok v borah Marijskogo Zavolzh'ya*. [Structural and functional organization of litter in the forests of the Mari Zavolzhye]. *Pochvovedenie*. = Eur. Soil. Sci. 2019; 1: 3-9. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36922214>

25. Berg B., McClaugherty C. *Plant Litter*, 4th ed. Switzerland. Cham: Springer. 2020. 332 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-59631-6>

26. Mamontov V.G., Mostovaya A.S. *Elementnyj sostav lesnyh podstilok dervnovopodzolistyh pochv probnyh ploshchadej Lesnoj opytnoj dachi*. [Element composition of forest litter of the soil test areas Forest Experiment Cottage]. *AgroEkoInfo: Elektronnyj nauchno-proizvodstvennyj zhurnal = AgroEco Info: Electronic scientific and production journal*. 2021. 2. (In Russ.). URL: [https://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/2/st\\_225.pdf](https://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/2/st_225.pdf)

27. Telesnina V. M., Podvezennaya M. A., Sorokin A. S., Meshalkina Yu. L. *Ocenka biomassy hvojno-listvennyh lesovna primere UOPEC MGU «Chashnikovo»* [Coniferous leaf-bearing forest biomass assessment by the example of

the educational and experimental soil and ecological center of Lomonosov Moscow state university “Chashnikovo”]. Pochvovedenie. = Eur. Soil Sci. 2024. 2 :37-45. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-2-37-45>

28. Tunyakin V. D., Rybalkina N. V., Shenshin L. M. *Lesoobrazovatel'nyj process v predel'no uzakoj polezashchitnoj lesnoj polose* [Forest formation process in extremely narrow forest shelter belt]. Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2022. Т. 12. № 2 (46): 56 -67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/5>

29. Odnoralov G. A., Tihonova E. N., Golyadkina I. V., Malinina T. A. Ocenka biologicheskoy produktivnosti lesnoj sredy v usloviyah urbanizacii (na primere Voronezhskoj nagornoj dubravyy). [Assessment of urban forest biological productivity (case study of the Voronezh upland oak forest)]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal.= Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal. 2020; 2(374): 60 -72. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-60-72>

### Сведения об авторах

✉ *Голядкина Инна Вячеславовна* – канд. с.-х. наук, доцент, кафедра ландшафтной архитектуры и почвоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4532-3810>, e-mail: [golyadkina@vgtu.ru](mailto:golyadkina@vgtu.ru)

*Горбунова Надежда Сергеевна* – канд. биол. наук, доцент, кафедра экологии и земельных ресурсов, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7986-8106>, e-mail: [vilian@list.ru](mailto:vilian@list.ru)

*Шешнищан Сергей Сергеевич* – канд. биол. наук, доцент, кафедра ландшафтной архитектуры и почвоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8027-855X>, e-mail: [sheshnitsan@gmail.com](mailto:sheshnitsan@gmail.com).

*Бахтин Андрей Михайлович* – аспирант, преподаватель, кафедра ландшафтной архитектуры и почвоведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9267-5901>, e-mail: [bakhtin\\_2019@inbox.ru](mailto:bakhtin_2019@inbox.ru)

*Царегородцев Алексей Васильевич* – канд. с.-х. наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения, старший научный сотрудник лаборатории мониторинга и проектирования лесов инженерингового центра НИИ Инновационных технологий и лесного комплекса ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-6080-3817>, e-mail: [tsar.ru@gmail.com](mailto:tsar.ru@gmail.com)

### Information about the authors

✉ *Inna V. Golyadkina* – Cand. Sci (Agric), Associate Professor, Landscape Architecture and Soil Science Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4532-3810>, e-mail: [golyadkina@post.vgtu.ru](mailto:golyadkina@post.vgtu.ru)

*Nadezhda S. Gorbunova* – Cand. Sci (Biol.), Associate Professor, Ecology and land resources Department, Voronezh State University, Universitetskaya square 1, Voronezh, Russian Federation, 394018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7986-8106>, e-mail: [vilian@list.ru](mailto:vilian@list.ru)

*Sergey S. Sheshnitsan* – Cand. Sci (Biol.), Associate Professor, Landscape Architecture and Soil Science Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8027-855X>, e-mail: [sheshnitsan@gmail.com](mailto:sheshnitsan@gmail.com).

*Andrey M. Bakhtin* – Post graduate student, Teacher, Landscape Architecture and Soil Science Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9267-5901>, e-mail: bakhtin\_2019@inbox.ru

*Alexey V. Tsaregorodtsev* – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Landscape Architecture and Soil Science, Senior Researcher, Engineering Centre of the Research Institute of Innovative Technologies and Forestry Complex, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-6080-3817>, e-mail: tsar.ru@gmail.com

✉- Для контактов/Corresponding author



## Экспериментальное использование остаточных компонентов переработки водорослей при выращивании семян сосны обыкновенной

Елена Н. Наквасина, e.nakvasina@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Мария В. Никитина, m.nikitina@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8056-8944>

Евгений М. Романов, e.romanov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8225-1991>

Сергей В. Коптев, s.koptev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

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

Проведено экспериментальное изучение по использованию сухих остаточных компонентов переработки водорослей (ламинария пальчато-рассеченная, *Laminaria digitata*, ламинария сахаристая, *Saccharina latissima* и две разновидности фукуса: фукус пузырчатый, *Fucus vesiculosus* и аскофиллум узловатый, *Ascophyllum nodosum*). В качестве основы для композиций субстратов использовали субстрат “Велторф”, подготовленный на основе верхового торфа. По общепринятым методам изучали комплекс водно-физических и агрохимических показателей. По результатам эксперимента установлено, что внесение сухих остаточных компонентов переработки водорослей не значительно влияет на водно-физические свойства экспериментальных субстратов. В то же время показано заметное подщелачивание субстрата при внесении даже 10 % водорослей и повышение pH среды. Водорослевые сухие отходы при внесении небольших доз способны повысить содержание подвижного калия в водной вытяжке субстрата, при повышении дозы более 50 % поддерживают уровень калия, соответствующий базовому субстрату. Добавка сухих водорослевых компонентов в количестве 30 % и более приводит к снижению содержания в субстрате нитратного азота и подвижного фосфора. В процессе выращивания однолетних семян сосны обыкновенной в теплице в субстратах с компонентами водорослей происходят большие, чем на контроле потери подвижного калия и нитратного азота, даже при внесении минеральных подкормок, согласно технологии, а также подщелачивание субстратов. Наблюдается высвобождение фосфатов, связанное с долей внесения водорослевого компонента. Подобная несбалансированность питания растений и реакции среды привела к ухудшению роста и развития семян первого года жизни. Положительное влияние сказалось лишь на росте главного корня семян. Использование остаточных компонентов переработки водорослей в качестве добавки к готовым субстратам возможно лишь в небольших дозах (не более 20 %, однако можно ожидать его большую положительную результативность при использовании кислых природных торфов в качестве базовой основы для приготовления субстратов).

**Ключевые слова:** субстраты, остаточные компоненты переработки водорослей, свойства субстратов, сосна обыкновенная, однолетние семена, закрытый грунт

**Финансирование:** Исследования проводились при финансировании АО «Архангельский ЦБК» в рамках договора на выполнение работ «Разработка составов субстрата для выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой» № ДД-513.2023 от 01.12. 2023 г. (рук. М.В. Никитина).

**Благодарности:** авторы благодарят Н.Н. Максимова, Л.В. Засухину, Н. Саидова за организацию и проведение эксперимента в теплице и лаборатории Лесного селекционного центра, рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

**Для цитирования:** Наквасина Е.Н., Никитина М.В., Романов Е.М., Коптев С.В. Экспериментальное использование отходов переработки водорослей при выращивании сеянцев сосны обыкновенной / Е.Н. Наквасина, М.В. Никитина, Е.М. Романов, С. В. Коптев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 23-37. –

*Поступила* 25.01.2025. *Пересмотрена* 25.02.2025. *Принята* 11.03.2025. *Опубликована онлайн* 24.03.2025.

Article

## Experimental use of residual components of algae processing waste in growing of pine seedlings

Elena N. Nakvasina, ✉ [e.nakvasina@narfu.ru](mailto:e.nakvasina@narfu.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Mariya V. Nikitina, [m.nikitina@narfu.ru](mailto:m.nikitina@narfu.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-8056-8944>

Evgeny M. Romanov, [e.romanov@narfu.ru](mailto:e.romanov@narfu.ru),  <https://orcid.org/000-0002-8225-1991>

Sergey V. Koptev, [s.koptev@narfu.ru](mailto:s.koptev@narfu.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

*Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoi Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation*

### Abstract

An experimental study was carried out on the use of dry residual components from the processing of algae (*Laminaria palmate*, *Laminaria digitata*, kelp saccharine, *Saccharina latissima* and two varieties of fucus: *fucus vesicularis*, *Saccharina latissima* and *ascophyllum nodosum*, *Ascophyllum nodosum*). “Veltorf” substrate, prepared on the basis of high-moor peat, was used as the basis for the substrate compositions. Using generally accepted methods, a complex of water-physical and agrochemical indicators was studied. Based on the results of the experiment, it was established that the addition of dry residual components from algae processing does not significantly affect the water-physical properties of the experimental substrates. At the same time, a noticeable alkalization of the substrate is shown when even 10 % of algae components is added and the pH of the environment increases. Algal dry components, when applied in small doses, can slightly increase the mobile potassium in the soil solution of the substrate; with an increase in the application dose, more than 50% maintains the level of potassium corresponding to the base substrate. The addition of dry algal components in an amount of 30% or more leads to a decrease the nitrate nitrogen and mobile phosphorus in the substrate. In the process of annual Scots pine seedlings growing in a greenhouse on substrates with algae, greater losses of mobile potassium and nitrate nitrogen occur than in the control, despite of mineral fertilizers adding according to technology, as well as alkalization of the substrates. There is a noticeable release of phosphates, directly related to the proportion of the algal component introduced. Such an imbalance in plant nutrition and environmental reaction led to growth degradation of seedlings in the first year of life. The positive effect only the growth of the main root of the seedlings. The use of algae residual processing as an additive to ready-made substrates is possible only in small doses (no more than 20 %), but one can expect greater positive results when using acidic natural peats as a base for preparing substrates.

**Keywords:** substrates, residual components of algae processing, properties of substrates, pine, annual seedlings, greenhouse

**Funding:** The research was carried out with the financing Arkhangelsk Pulp and Paper Mill JSC within the framework of the work contract "Development of substrate formulations for growing planting material with a closed root system" No. DD-513.2023 dated December 01, 2023 (supervisor M.V. Nikitina).

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to reviewing the article.

**Conflict of interest:** authors declare no conflict of interest

**For citation:** Nakvasina E.N., Nikitina M.V., Romanov E.M. Koptev S.V., (2025). Experimental use of algae processing waste in growing of pine seedlings. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 23-37 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/2>

**Received** 25.01.2025. **Revised** 25.02.2025. **Accepted** 11.03.2025. **Published online** 24.03.2025.

### Введение

Морские водоросли имеют уникальный биохимический состав и могут быть использованы в качестве источников природных минеральных веществ, углеводов, белков (1, 2, 3) и по мнению ученых имеют разносторонний потенциал (4). Они находят применение для получения ценных препаратов (агар, маннит, альгинат) и применяются в медицинской и пищевой промышленности (5,6,7).

В них присутствуют биологически активные вещества и минеральные соединения, которые делают их незаменимыми в качестве добавок в рецептуры кормов рыб и сельскохозяйственных животных [8]. Они содержат много питательных веществ, включая азот, фосфор, калий и важные витамины и могут найти применение в качестве удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур [9, 10, 11]. Подобное использование морских водорослей, заготовленных при штормовых выбросах, издревле практиковалось в приморских районах страны.

Они могут быть полезны для решения экосистемных проблем, связанных с потеплением климата, в частности со снижением проблем эвтрофикации, за счет поглощения избытка фосфора и азота (12). В то же время считается, что морские водоросли обогащают почву биологически ценными органическими и минеральными веществами (С, N, P, входящие в их состав Mn и Са позволят снизить кислотность почв. Они разрыхляют почву, способствуют сохранению влаги в ней и привносят азотосовояющие бактерии [11], что способствует повышению плодородия почв, усилению развития корневой системы и увеличению урожайности растений [17, 18]. В связи с высоким содержанием в морских водорослях цитокининов, ауксинов, гиббереллинов, аминокислот, фитогормонов, осмозащитных, минеральных питательных элементов и антимикробных соединений, водоросли являются устойчивыми био-

стимуляторами и повышают устойчивость и выживаемость растений, особенно в стрессовых условиях [16]. Благодаря этому, в настоящее время использование морских водорослей и препаратов из них считается наиболее перспективным в сельском хозяйстве.

При переработке водорослей, в том числе и на Архангельском водорослевом комбинате, образуется большое количество твердых (сухих) остаточных компонентов, которые содержат высокую концентрацию биоразлагаемых ценных органических и неорганических веществ, и могут найти широкое применение в разных направлениях: для биотехнологии, для производства био-наполнителей, пищевых продуктов, усилителей вкуса, в качестве корма скоту и на удобрения [21, 22]. Их можно также применять в качестве компонентов для приготовления компостов [23, 24], в том числе в смеси с рыбными отходами. Хороший компост с высокой долей отходов переработки водорослей соответствует использованию непосредственно свежих водорослей (например, морской капусты) и способен поддерживать высокие темпы роста растений даже при низких дозах внесения [26].

Подобное использование сухих остаточных компонентов переработки водорослей может быть перспективным в регионах их получения, когда производство заинтересовано в подборе субстратов, в том числе для конкретных пород, в тепличных комплексах [27]. В настоящее время работы по исследованию возможностей применения сухих отходов переработки водорослей как перспективных агрохимикатов только начинаются, для лесного хозяйства носят поисковый характер. Особенно важно их применение для основных лесообразующих пород региона, в частности сосны обыкновенной, и получения выхода стандартных семян за однолетний период выращивания в условиях закрытого грунта.

Цель наших исследований состояла в проверке воз-

возможностей использования сухих остаточных компонентов переработки морских водорослей, полученных на Архангельском водорослевом комбинате, в качестве добавки к субстратам для повышения уровня обеспеченности питательными веществами и обеспечения экологической и экономической выгоды за счет снижения применения минеральных

### Материалы и методы

Исследования проводили на базе Лесного селекционно-семеноводческого центра (ЛССЦ, г. Новодвинск). Использовали субстрат “Велторф”, подготовленный на основе верхового торфа (рН 4,5-5,0, содержащего 120-180 мг/л подвижных форм азота (суммарно аммонийный и нитратный), 100-170 мг/л фосфора в пересчете на  $P_2O_5$ , 230-310 мг/л калия в пересчете на  $K_2O$ ). В качестве экспериментальной добавки применяли сухие остаточные компоненты переработки водорослей, заготовленных в Белом море: ламинария пальчаторассеченная (*Laminaria*, ламинария сахаристая, или сахарина большая и две разновидности фукуса - фукус пузырчатый и аскофиллум узловатый (*Ascophyllum nodosum*), полученные на Архангельском водорослевом комбинате, после производства фармацевтического сырья, пищевых продуктов и натуральной косметики.

Сухие компоненты водорослей имели обменную кислотность рН 9,5, насыщены органическими компонентами (плотность твердой фазы составила 0,752 г/см<sup>3</sup>), содержали 3,62 мг/100 г нитратного азота, но очень мало подвижных форм фосфора и калия (менее 0,011 мг/100 г).

Постановка опыта включала добавку к субстрату компонентов водорослевого производства от 10 до 70 %, набивку кассет (81 ячейка объемом 0,9 дм<sup>3</sup>), посев семян сосны и выращивание однолетних сеянцев по технологии производственной теплицы ЛССЦ на фоне подкормок, начиная с 1 недели после посева (в мае-июле 2 подкормки Акварин 5 (N – 18 %) по 3,9 г/м<sup>2</sup> и 6 подкормок по 7,8 г/м<sup>2</sup>; в августе – 4 подкормки Акварин 5 (N – 6 %) с дозой 3,9 г/м<sup>2</sup>). На каждый вариант закладывали 4-5 кассет. В качестве контроля использовали субстрат “Велторф” без добавок водорослевого компонента.

удобрений при выращивании сеянцев древесных пород, в частности на примере сосны обыкновенной, на комбинированных субстратах в теплице.

Изучение субстрата проводили до начала эксперимента и в динамике с интервалом не реже 20 дней. Изучали следующие агрохимические показатели: зольность (прокаливанием по ГОСТ 11306-2013 п.7; Обменная кислотность – ГОСТ 11623-89 п.2; массовая доля нитратного азота (сухое вещество), % – ГОСТ 27894.4-88 п.4; массовая доля калия в пересчете на  $K_2O$  – ГОСТ 27753.6-88 п.3; массовая доля фосфора в пересчете на  $P_2O_5$  (на сухое вещество) – ГОСТ 27894.4-88 п.3.

Плотность сухого субстрата (масса единицы объема, г/см<sup>3</sup>) определяли насыпным способом, с использования режущего ножа (бурика) с известным объемом в абсолютно сухом состоянии. Расчет плотности проводили общепринятыми способами. Истинную плотность (плотность твердой фазы) определяли пикнометрическим методом. Рассчитали пористость субстрата общепринятыми в почвоведении способами [19].

Полную влагоемкость (%) – способность торфа поглощать и удерживать воду определяли в цилиндрах с сетчатым дном по соответствующим методикам [20].

Все эксперименты проводились в 4-5 повторностях.

В конце сезона вегетации проводили выкопку и замеры не менее 50 шт. сеянцев сосны из каждого варианта кассет. Измеряли высоту, диаметр, отмечали число сеянцев с разветвлениями осевого побега. Определяли сухую массу надземной и корневой части растений в абсолютно сухом состоянии. Биометрические показатели обрабатывали методами вариационной статистики.

**Результаты и обсуждение**

Сухие остаточные компоненты переработки водорослей представляют из себя органическую массу, по степени зольности ниже зольности субстрата на основе верхового торфа, и повышают содержание органической массы в смешанных композициях экспериментальных субстратов (табл. 1). Это приводит также к тому, что за счет меньшей истинной плотности они способствуют ее снижению при смешивании с промышленным субстратом. Однако в них много мелких раздробленных частиц, что несколько повышает насыпную плотность экспериментальных субстратов пропорционально внесённой доле водорослевого компонента. Несмотря на то, что различия невелики (10-15 %), но все же это влияет на клинальное снижение таких показателей, как скважность и полная влагоемкость.

Соотношение торфа и компонентов переработки водорослей значимо определяет все показатели водно-физических свойств субстратов, и прежде всего, их зольность (коэффициент корреляции  $r$  равен -0,985). От содержания органики в свою очередь зависят плотность и истинная плотность ( $r = 0,579$  и  $-0,751$  соответственно), пористость ( $r = -0,811$ ) и полная влагоемкость ( $-0,549$ ).

Согласно полученным данным (табл. 1), наиболее заметные изменения свойств наблюдаются при добавке в субстрат водорослевого компонента более 4 частей по объёму. Внесение водорослей в меньших долях (10-40 %) незначительно влияет на изменение водно-физических свойств экспериментальных субстратов по сравнению с контролем.

Таблица 1

Сравнительная характеристика водно-физических свойств субстратов с добавлением остаточных компонентов переработки водорослей (В)

Table 1

Comparative characteristics of the water-physical properties of substrates with the addition of residual components of algae processing (В)

Вариант	Зольность, % / Ash content, %	Плотность, г/см <sup>3</sup> / Density, g/cm <sup>3</sup>	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup> / True density, g/cm <sup>3</sup>	Пористость общ., % / Porosity gen., %	Полная влагоемкость, % / Full moisture capacity, %
10Т*	7,75	0,164	1,698	91,1	564,6
1чВ+9чТ	7,70	0,181	1,415	87,2	535,9
2чВ+8чТ	7,47	0,178	1,389	87,9	548,7
3чВ+7чТ	6,98	0,180	1,273	86,4	556,7
4чВ+6чТ	6,83	0,179	1,298	86,8	572,6
5чВ+5чТ	6,26	0,197	1,405	85,9	506,5
6чВ+4чТ	6,06	0,190	1,319	85,6	515,1
7чВ+3чТ	5,93	0,177	1,213	85,9	532,5

В – водорослевые компоненты / algal components, Т – субстрат / substrate.

Источник: собственные экспериментальные данные / Source: own experimental data

Более заметные изменения происходят с агрохимическими свойствами при добавлении к торфяному субстрату водорослевого компонента (табл. 2). Как отмечалось в ранее проведенных исследованиях других авторов [12] водоросли и их жмых снижают

кислотность почвы/субстрата, пропорционально величине добавки на 0,3-0,6 рН на каждые 10 % внесения водорослевого компонента. Однако при применении готовых субстратов, в частности “Велторф”, используемый в опыте с рН 4,5-5,0, подобное подщелачивание может быть нежелательным, так как

реакция почвенного раствора становится не соответствующей биолого-экологическим требованиям хвойных пород. Так, согласно [28] наиболее оптимальной кислотностью среды для выращивания сеянцев ели является рН 4,0-5,0, для сосны – 4,5-5,5, для лиственницы – 5,5-6,0. В то же время, подобное

влияние сухих компонентов переработки водорослей может быть полезным при применении в качестве основы для создания субстратов из природного торфа, кислотность которого часто не превышает рН заменять химические раскислители.

Таблица 2

Сравнительная характеристика агрохимических свойств субстратов с добавлением компонентов переработки водорослей (В)

Table 2

Comparative characteristics of the agrochemical properties of substrates with the addition of algae processing components (B)

Вариант / Variant	Обменная кислотность, рН / Metabolic acidity, рН	Массовая доля, мг/100г (на сухое вещество) / Mass fraction, mg/100g (on dry matter)		
		калия в пересчете на К <sub>2</sub> О, мг/100г / potassium in terms of К <sub>2</sub> О, mg/100g	нитратного азота, мг/100г / nitrate nitrogen, mg/100g	фосфора в пересчете на Р <sub>2</sub> О <sub>5</sub> , мг/100г / phosphorus in terms of Р <sub>2</sub> О <sub>5</sub> , mg/100g
10Т*	5,0	494	6,61	26,86
1чВ+9чТ	5,7	617	17,38	23,69
2чВ+8чТ	6,2	733	15,65	17,94
3чВ+7чТ	6,6	662	13,49	13,48
4чВ+6чТ	7,1	624	10,12	7,14
5чВ+5чТ	7,7	543	1,15	0,30
6чВ+4чТ	8,0	479	1,17	0,30
7чВ+3чТ	8,4	457	2,00	0,30

\* В - водорослевые компоненты / algal components, Т – субстрат / substrate.

Источник: собственные экспериментальные данные / Source: own experimental data

Внесение сухих остаточных компонентов переработки водорослей, не смотря на низкое содержание в них подвижного калия, не снижает его количество в экспериментальных субстратах, а даже способствуют его некоторому повышению при внесении не более 50 % по объему. Это может быть связано с высвобождением калия из сухих отходов водорослей при относительно невысокой кислотности

при малых дозах их внесения в субстрат. При увеличении подщелачивания, высвобождение калия снижается, что отражается в криволинейности зависимости (рис. 1). По фосфатам и нитратному азоту проявляется прямолинейная и близкая к ней связь с долей сухих водорослевых компонентов, внесенных в субстрат.

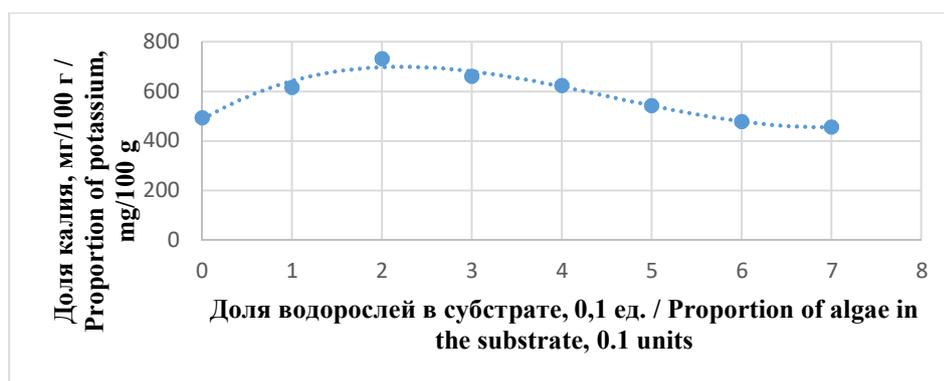


Рисунок 1. Зависимость содержания подвижного калия ( $K_2O$ ) в экспериментальных субстратах

Figure 1. Dependence of mobile potassium share ( $K_2O$ ) in experimental substrates

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Зависимость выражается уравнением:

$$D_k = 486,9 + 216,05 \cdot D_v - 64,672 \cdot D_v^2 + 4,7348 \cdot D_v^3 \quad (1)$$

Где  $D_k$  – Доля калия, мг/100 г

$D_v$  – доля водорослей в субстрате, 0,1 ед

Увеличение содержания фосфора, привнесимого с отходами водорослей, что было получено в результатах других авторов [14] нами не наблюдалось. Наоборот, внесение водорослевого компонента в субстрат снижает содержание подвижного фосфора в почвенном растворе. Резкое снижение содержания фосфатов, возможно, связанное с фиксацией органическими материалами водорослевого компонента их мобильных форм, начинается с добавки их в экспериментальный субстрат в количестве 30 %, а при увеличении доли отходов в субстрате до 50 % и повышении величины pH более 7, в почвенном растворе остаются его следовые количества.

Аналогично фосфору прослеживается и изменение содержания нитратного азота в экспериментальных субстратах с использованием различных долей внесения компонентов водорослевого производства. При их доле до 40 % идет отдача азота нитратных форм, а при увеличении доли 50 % и выше – сорбция и поглощение из почвенного раствора.

Возможно, именно на сорбирующей роли водорослей и основано мнение о возможности использования отходов их переработки для поглощения азота и фосфора при очистке сточных вод.

По мнению Abobatta, 2024 [16] на эффективность экстрактов морских водорослей, используемых

в сельском хозяйстве, влияют различные факторы, такие как источник морских водорослей, методы производства и концентрация. Важна также и технология их применения для улучшения роста растений.

Добавка компонентов водорослевого производства может быть перспективной с точки зрения улучшения агрохимических свойств субстратов при их использовании в малых дозах, при внесении не более 20 %. Их использование поможет поддержать содержание нитратного азота и калия, но потребует дополнительного внесения фосфорных удобрений.

Проследили динамику изменения агрохимических свойств субстратов при внесении в их состав компонентов водорослей. Это связано с проведением подкормок, применяемых в технологии выращивания посадочного материала. Дополнительное внесение минеральных удобрений может изменить свойства субстрата, а органические добавки либо предотвратить, либо усилить происходящие изменения.

Субстрат без добавки сухих водорослей в течение цикла выращивания посадочного материала (примерно 150 дней) несколько подщелачивается (на 0,5-0,9 pH). Экспериментальные субстраты с добавкой водорослевого компонента ведут себя по-разному, в зависимости от доли их внесения. При добавке 10-30 % водорослей в субстрат изменения

соответствуют колебаниям субстрата без добавок, то есть идет подщелачивание в такой же пропорции рН (рисунок 2). При больших добавках сухих водорослей, наблюдается некоторое подкисление, рН снижается на 0,1 – 0,2 единица на каждые 10 % ор-

ганических водорослевых компонентов в экспериментальном субстрате. Вероятно, в этом случае начинают действовать поглощательные свойства водорослей, которые проявились с подвижным фосфором и нитратным азотом (табл. 3).

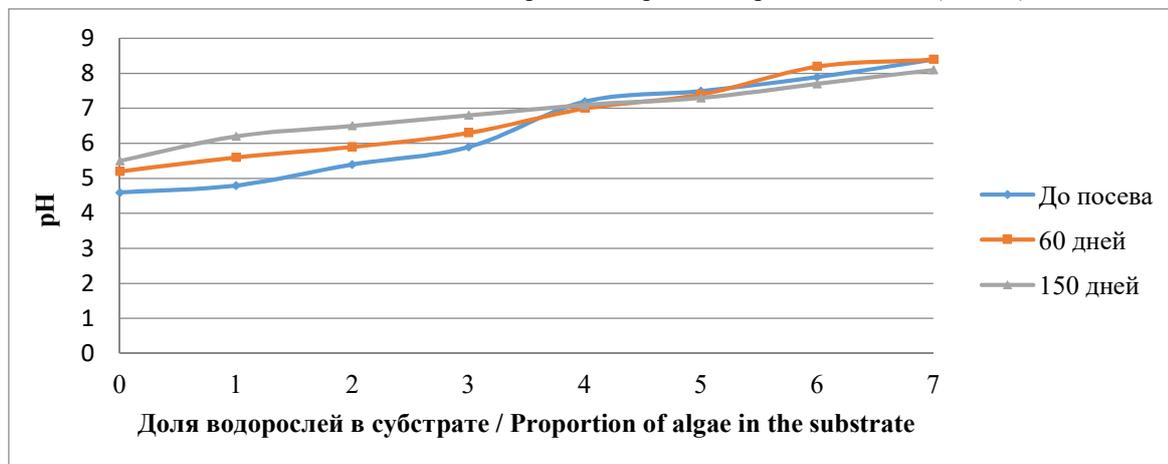


Рисунок 2. Динамика реакции среды при выращивании однолетних сеянцев сосны обыкновенной  
 Figure 2. Dynamics of environmental reaction when growing annual pine seedlings  
 Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

В процессе выращивания сеянцев по принятой в теплице технологии, несмотря на поддерживающий потенциал вносимых минеральных подкормок, в контрольном и экспериментальных субстратах происходили потери питательных веществ, расходуемых сеянцами сосны в течение ротации их выращивания. Содержание подвижного калия во всех вариантах опыта синхронно уменьшилось в 4-5 раз (таблица 3). Содержание нитратного азота снизилось до 4-5 % от начального количества в исходном субстрате, не зависимо от доли его внесения. Не исключено влияние поглощательных свойств водорослевого компонента, которое отмечалось выше, так как в контрольном варианте через 100 дней вегетации и внесения подкормок, включающих азот, содержание его восстанавливается до 22 % от начального.

В то же время, внесение сухих остаточных компонентов водорослей способствовало повышению фосфатов в подвижной форме, вероятно за счет их высвобождения в процессе компостирования на фоне подщелачивания почвенного раствора (рисунок 2). Содержание фосфатов значимо зависит от доли сухих водорослевых отходов в субстрате (коэффициент корреляции  $r = 0,780$ ).

Получены уравнения связи массовой доли химических элементов (Y), в % сухого вещества от срока посева с долей сухих компонентов переработки водорослей (X) при выращивании сеянцев сосны обыкновенной в теплице на субстратах (рис. 3 – 5).

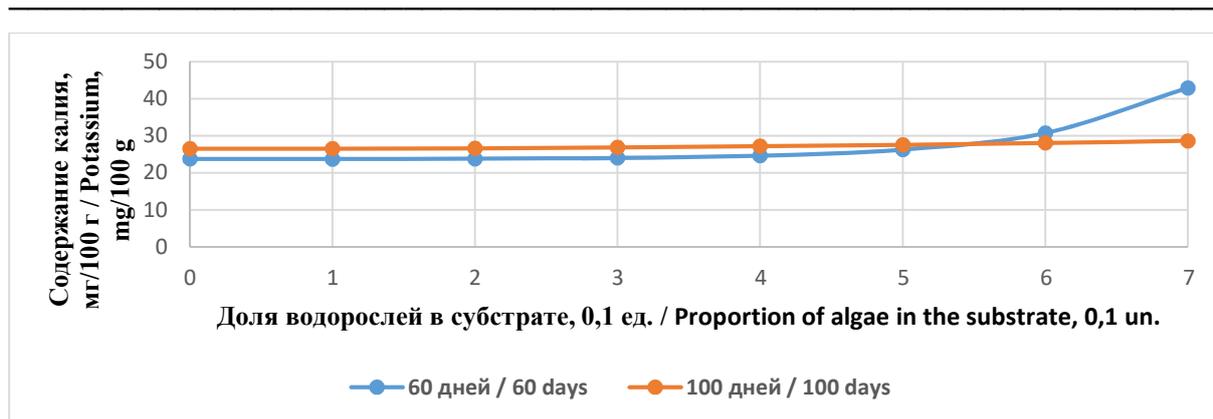


Рисунок 3. Динамика изменения содержания калия в пересчете на  $K_2O$  (уравнения 3, 4).

Figure 3. Dynamics of changes in potassium in terms of  $K_2O$  (equations 3, 4)

$$60 \text{ дней: } Y=23,686+0,01759 \cdot e^x \quad R^2=0,74 \quad (3)$$

$$100 \text{ дней: } Y=26,54+0,0437 \cdot X^2 \quad R^2=0,26 \quad (4)$$

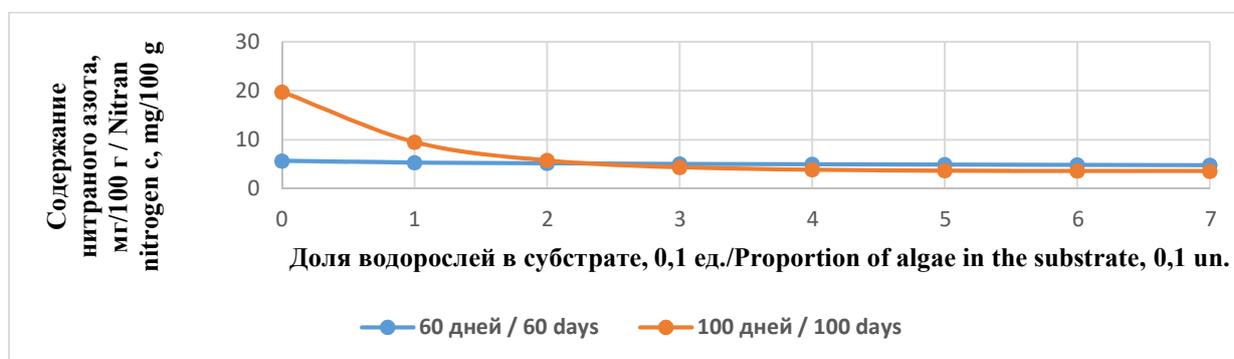


Рисунок 4. Динамика изменения нитратного азота (уравнения 5, 6)

Figure 4. Dynamics of changes in nitrate nitrogen (Equations 5, 6)

$$60 \text{ дней: } Y=5,86-0,3339 \cdot x^{0,5} \quad R^2=0,24 \quad (5)$$

$$100 \text{ дней: } Y=3,589+16,177 \cdot e^{-x} \quad R^2=0,285 \quad (6)$$

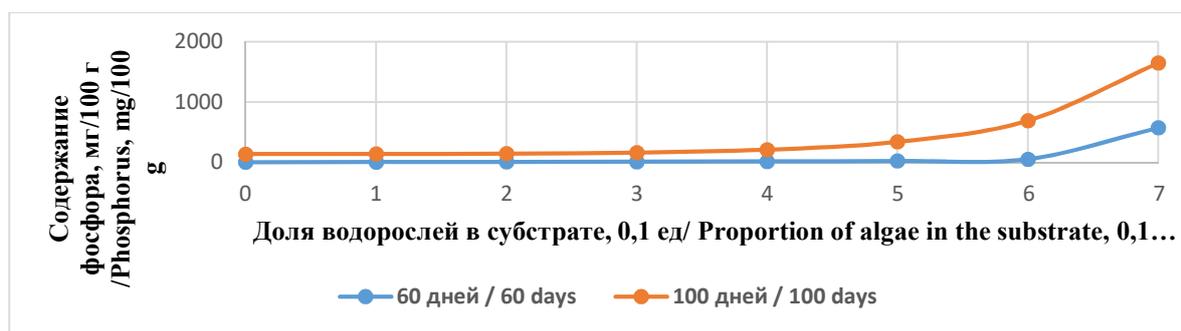


Рисунок 5. Динамика изменения фосфора в пересчете на  $P_2O_5$  (уравнения 7, 8)

Figure 5. Dynamics of changes in phosphorus in terms of  $P_2O_5$  (equations 7, 8)

$$60 \text{ дней: } Y=(6,877+0,335 \cdot x)/(1-0,140 \cdot x) \quad R^2=0,24 \quad (7)$$

$$100 \text{ дней: } Y=138,3+1,376 \cdot e^x \quad R^2=0,28 \quad (8)$$

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Таблица 3

Динамика изменения массовой доли химических элементов (% сухого вещества от даты посева) при выращивании сеянцев сосны обыкновенной в теплице на субстратах с добавлением сухих компонентов переработки водорослей

Table 3

Dynamics of the mass fraction of chemical elements (% of dry matter from the date of sowing) when growing pine seedlings in a greenhouse on substrates with the addition of dry residual components from algae processing

Вариант / Variant	Калий в пересчете на K <sub>2</sub> O / Potassium in terms of K <sub>2</sub> O		Нитратный азот / Nitrate nitrogen		Фосфор в пересчете на P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / Phosphorus in terms of P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
	60 дней / 60 days	100 дней / 100 days	60 дней / 60 days	100 дней / 100 days	60 дней / 60 days	100 дней / 100 days
10Т*	23,8	26,5	4,5	21,8	4,0	71,9
1В+9Т	25,4	24,8	8,4	4,4	17,7	101,9
2В+8Т	30,1	29,7	4,5	4,5	6,1	134,7
3В+7Т	21,9	26,9	4,5	4,5	12,9	293,5
4В+6Т	24,9	29,1	4,9	4,9	12,9	277,6
5В+5Т	18,6	24,5	4,2	4,2	13,0	397,8
6В+4Т	31,6	25,1	4,6	4,6	100,0	516,0
7В+3Т	43,7	31,6	5,4	5,4	511,3	1701,3

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

После первого года ротации провели сравнение роста сеянцев сосны обыкновенной между вариантами используемых субстратов.

Добавление к субстрату “Велторф” водорослевого компонента не улучшило рост и развитие однолетних сеянцев сосны (табл. 4).

Таблица 4

Характеристика однолетних сеянцев сосны, выращенных на субстрате с добавлением компонентов переработки водорослей

Table 4

Characteristics of annual pine seedlings grown on a substrate with the addition of residual components of algae processing

Вариант / Variant	Диаметр у шейки корня, мм / Diameter at the root neck, mm	Высота сеянца, см / Seedling height, cm	Длина стержневого корня, см / Rod length root, cm	Количество сеянцев с боковыми побегами, % / Number of seedlings on the sides shoots, %	Масса 10 сеянцев, абс. сух., г / Weight of 10 seedlings, abs. dry, g		Соотношение надземной части / корни / Aboveground part / roots ratio
					наземная часть	корни	
10Т / 10							
1В9Т / 1W9S							

2B8T / 2W8S							
3B7T / 3W8S							
4B6T / 4W6S							
5B5T / 5W5S							
6B4T / 6W4S							
7B3T / 7W3S							

\* В – отходы переработки водорослей (waste), Т – субстрат (substrate); \*\* – в числителе – среднее значение, в знаменателе – минимальное и максимальное.

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Наблюдается снижение по высоте на 15-43 %, по диаметру у шейки корня на 13-27 %, уменьшение массы растений и развитости (число боковых побегов). Все эти снижения наблюдаются с добавки малых объемов (10 %) водорослевого компонента и возрастают с увеличением их доли в субстрате. Не исключено, что главным фактором ограничения роста, явилось подщелачивание субстрата, выше биологически обоснованного для породы уровня, и снижающего развитие микоризы и поступление питательных веществ [29].

Единственный показатель, который позитивно среагировал на внесение водорослевого компонента – главный стержневой корень. Стимулирование роста корневой системы водорослевыми компонентами отмечалось в исследованиях [14, 16]. В результате, несмотря на снижение массы корней и надземной части по сравнению с контролем, их соотношение с надземной частью однолетних сеянцев сосны обыкновенной изменилось незначительно, в пределах 5-6 %.

### Заключение

Экспериментальное использование сухих остаточных отходов переработки ламинарии, аскофиллума и фукуса, полученных на Архангельском водорослевом комбинате, для добавки в субстрат (“Велторф”) при выращивании сеянцев сосны обыкновенной в теплице, позволило проследить механизм изменения водно-физических и агрохимических свойств при различной доле их применения. Добавление водорослевого компонента к субстрату на основе верхового торфа незначительно меняет его

рыхлость и водопоглощение. Агрохимические свойства субстрата реагируют на внесение сухих водорослевых компонентов в зависимости от соотношения их в исходном субстрате. При малых дозах внесения (10-20 % по объему) они могут оказать стимулирующее или поддерживающее значение в обеспечении почвенного раствора нитратным азотом и подвижными формами калия и фосфора. Однако при увеличении дозы внесения вступают в действие сорбирующие силы органического компонента водорослей, и перехватывают водорастворимые вещества, которые могли бы поступить на питание растений. Это ведет к ухудшению роста посадочного материала. Одной из причин подобного поведения водорослевого компонента может быть резкое подщелачивание субстратов при больших дозах внесения водорослевого компонента.

Не смотря на весьма позитивные ожидания и результаты, полученные другими авторами, механизм действия остаточных компонентов водорослевого производства Архангельского водорослевого комбината отличается, и требует дополнительного рассмотрения в различных вариантах использования. Можно ожидать его большую положительную результативность при использовании кислых природных торфов в качестве базовой основы для приготовления субстратов.

## Список литературы

1. Dhargalkar V.K., Pereira N. Seaweed: promising plant of the millennium // *Science and Culture*. 2005; 71: 60–66 (in Engl.)
2. Hasselström, L., Thomas, J.B., Nordström, J. *et al.* Socioeconomic prospects of a seaweed bioeconomy in Sweden // *Science Report*. 2020; 10: 1610. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58389-6> (in Engl.)
3. Zhang, L., Liao, W., Huang, Y. *et al.* Global seaweed farming and processing in the past 20 years // *Food Product Process and Nutrient*. 2022; 4: 23. <https://doi.org/10.1186/s43014-022-00103-2> (in Engl.)
4. Buschmann A.H., Camus C., Infante J., Neori A., Israel Á., Hernández-González M.C., Pereda S.V., Gomez-Pinchetti J.L., Golberg A., Tadmor-Shalev N. & Critchley A.T. Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity, *European Journal of Phycology*, 2017; 52,4: 391–406. DOI: 10.1080/09670262.2017.1365175 (in Engl.)
5. Подкорытова А. В., Игнатова Т. А., Бурова Н. В., Усов А. И. Перспективные направления рационального использования промысловых красных водорослей рода *Ahnfeltia*, добываемых в прибрежных зонах морей России // *Труды ВНИРО*. – 2019. Т. 176. – С. 14–26.
6. Коровкина Н.В., Богданович Н.И., Кутакова Н.А. Исследование состава бурых водорослей Белого моря с целью дальнейшей переработки // *Химия растительного сырья*. 2007. – №1. – С. 59–64.
7. Наумов И.А., Буркова Е.А., Канарская З.А., Канарский А.В. Водоросли - источник биополимеров, биологически активных веществ и субстрат в биотехнологии. Часть 1. Биополимеры клеток тканей водорослей // *Вестник Казанского технологического университета*. –2015. –№1. – с. 198–203.
8. Popescu M. Agricultural uses of seaweeds extracts // *Current trends in natural sciences*. 2013; 2: 36–39 (in Engl.)
9. Щербак А.П., Тишков С.В. Водоросли Белого моря и перспективы их использования // *Вестник Российского университета Дружбы народов*. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. –2015. –№4. – С. 60–67.
10. Eyra M.C., Defosse G.E., Dellatorre F. Seaweed compost as an amendment for horticultural soils in Patagonia, Argentina. // *Compost Sci. Util*. 2008; 16L 119–124. (in Engl.)
11. Pandya M., Mehta S. Seaweed Utilizing as a Biostimulants in Agriculture Sector: A Review // *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 2023; 11 Is. III <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.49561> (in Engl.)
12. Satyabrata S., Mitali P., Lakshman N. Uses of seaweed and its application to human welfare: a review // *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*. 2016; 8: 12–20 (in Engl.)
13. Юркевич М.Г., Сидорова В.А., Дубровина И.А. Влияние применения экстрактов бурой морской водоросли *Fucus vesiculosus* L. на плодородие почв и продуктивность растений [Электрон. ресурс] // *АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал*. – 2021. – №5. Режим доступа: [http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/5/st\\_517.pdf](http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/5/st_517.pdf). Дата обращения 06.01.2025 г. DOI: <https://doi.org/10.51419/20215517>
14. Kaur I. Seaweeds: Soil Health Boosters for Sustainable Agriculture. In: Giri, B., Varma, A. (eds) *Soil Health. Soil Biology*. 2020; 59. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_10) (in Engl.)
15. Abobatta W.F. Seaweed Extract as a Tool for Sustainable Agriculture // *JOJ Horticulture* 2024; 4(2): JOJHA.MS.ID.555634 DOI: 10.19080/JOJHA.2023.04.555634 (in Engl.)
16. MacKinnon S.A., Craft C.A., Hiltz D., Ugarte R. Improved methods of analysis for betaines in *Ascophyllum nodosum* and its commercial seaweed extracts // *J. Appl. Phycol*. 2010; 22: 489–494. (in Engl.)
17. Chen S.K., Edwards C.A., Subler S. The influence of two agricultural biostimulants on nitrogen transformations, microbial activity, and plant growth in soil microcosms // *Soil Biol. Biochem*. 2003; 35: 9–19. (in Engl.)
18. Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение: учебн. пособие., Архангельск: САФУ, 2016. 146 с.
19. Мисников О.С. Физико-химические основы торфяного производства: учебное пособие / О.С. Мисников, О.В. Пухова, Е.Ю. Черткова. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2015. –168 с.
20. Luo, X., Wu, Y., Wang, S. *et al.* Frontier review of key reduction technologies and resource utilization of waste during the seaweed gel production process // *Blue Biotechnology*. 2024. 1, 12 <https://doi.org/10.1186/s44315-024-00013-7> (in Engl.)
21. Torres, M.D., Kraan, S. & Domínguez, H. Seaweed biorefinery // *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2019. 18, 335–388 <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09496-y> (in Engl.)
22. Sushri S.B., Elavarasan K., Safeena M.P., Devi H.M., Tejpal C.S. Valorisation of Seaweed Waste from // *Agar Processing Industry. Examines Mar Biol Oceanogr*. 2023; 5(3): EIMBO. 614 DOI: 10.31031/EIMBO.2023.05.000614 (in Engl.)
23. López-Mosquera E., Fernández-Lema E., Villares R., Corral R., Alonso B., Blanco C. Composting Fish Waste and Seaweed to Produce a Fertilizer for use in Organic Agriculture // *Procedia Environmental Sciences*. –2011; 9:113–117. DOI- 10.1016/j.proenv.2011.11.018 (in Engl.)

24. Michalak I., Tuhy Ł., Chojnacka K. Co-Composting of Algae and Effect of the Compost on Germination and Growth of *Lepidium sativum* // Pol. J. Environ. Stud. 2016; 25 (3):1107–1115. DOI: 10.15244/pjoes/61795 (in Engl.)
25. Cole A.J., Roberts D.A., Garside A.L. et al. Seaweed compost for agricultural crop production // J. Appl. Phycol. 2016; 28: 629–642 <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0544-2> (in Engl.)
26. Коновалова Д.А., Пономарев Д.Д., Братилова Н.П., Коротков А.А., Мантулина А.В. Выращивание семян сосны кедровой сибирской с закрытой крневой системой на экспериментальных субстратах // Хвойные бореальной зоны. –2023. –Т. XLI, № 5. –С. 379–383 DOI: 10.53374/1993-0135-2023-5-379-383
27. Субстраты торфяно-перлитные технические условия ТУ ВУ 100061961.002-2015 Утв. Первый заместитель Министра Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь А. А. Кулик 31.03.2015 г. <https://mlh.by/lioh/2015-5/3.pdf>;
28. Наквасина Е.Н. Ритмика роста семян сосны и ели. Биоэкологическое обоснование агротехники выращивания. Архангельск, 2016. –158 с.

### References

1. Dhargalkar V.K., Pereira N. *Seaweed: promising plant of the millennium* // Science and Culture. 2005; 71: 60-66
2. Hasselström, L., Thomas, JB., Nordström, J. et al. *Socioeconomic prospects of a seaweed bioeconomy in Sweden* // Science Report. 2020; 10: 1610. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58389-6>
3. Zhang, L., Liao, W., Huang, Y. et al. *Global seaweed farming and processing in the past 20 years* // Food Product Process and Nutrient. 2022; 4: 23. <https://doi.org/10.1186/s43014-022-00103-2>
4. Buschmann A.H., Camus C., Infante J., Neori A., Israel Á., Hernández-González M.C., Pereda S.V., Gomez-Pinchetti J.L., Golberg A., Tadmor-Shalev N. & Critchley A.T. *Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity*, European Journal of Phycology, 2017; 52, 4: 391-406. DOI: 10.1080/09670262.2017.1365175
5. Podkorytova A. V., Ignatova T. A., Burova N. V., Usov A. I. *Perspektivnye napravleniya racional'nogo ispol'zovaniya promyslovykh krasnykh vodoroslej roda Ahnfeltia, dobyvaemykh v pribrezhnykh zonah morej Rossii* [Promising areas of racial use of industrial red reservoirs of the genus *Ahnfeltia*, mined in the coastal zones of the Russian sea] // Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO. 2019;176: 14–26. (In Russ.)
6. Korovkina N.V., Bogdanovich N.I., Kutakova N.A. *Issledovanie sostava burykh vodoroslej Belogo morya s cel'yu dal'nejshej pererabotki* [Investigation of the composition of brown algae of the White Sea for the purpose of further processing] // Himiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw materials. 2007;1: 59–64. (In Russ.)
7. Naumov I.A., Burkova E.A., Kanarskaya Z.A., Kanarskij A.V. *Vodorosli - istochnik biopolimerov, biologicheski aktivnykh veshchestv i substrat v biotekhnologii. Chast' I. Biopolimery kletok tkanej vodoroslej* [Algae is a source of biopolymers, biologically active substances and a substrate in biotechnology. Part 1. Biopolymers of algae tissue cells] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University.. 2015;1: 198-203. (In Russ.)
8. Popescu M. *Agricultural uses of seaweeds extracts* // Current trends in natural sciences. 2013. V. 2. Pp. 36–39
9. Shcherbak A.P., Tishkov S.V. *Vodorosli Belogo morya i perspektivy ih ispol'zovaniya* [Algae of the White Sea and prospects for their use] // Vestnik Rossijskogo universiteta Druzhyby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety.. 2015; 4: 60–67. (in Russ.)
10. Eyra M.C., Defosse G.E., Dellatorre F. *Seaweed compost as an amendment for horticultural soils in Patagonia, Argentina*. // Compost Sci. Util. 2008. –V. 16. – Pp. 119–124.
11. Pandya M., Mehta S. *Seaweed Utilizing as a Biostimulants in Agriculture Sector: A Review* // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2023; 11. Is. III <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.49561>
12. Satyabrata S., Mitali P., Lakshman N. *Uses of seaweed and its application to human welfare: a review* // International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences. 2016; 8: 12–20.
13. Yurkevich M.G., Sidorova V.A., Dubrovina I.A. *Vliyaniye primeneniya ekstraktov buroj morskoy vodorosli Fucus vesiculosus L. na plodorodie pochv i produktivnost' rastenij* [The effect of using extracts of brown seaweed *Fucus vesiculosus* L. soil fertility and plant productivity] // AgroEkoInfo: Elektronnyj nauchno-proizvodstvennyj zhurnal =

AgroEcoInfo: An electronic scientific and production journal. 2025; 5. Rezhim dostupa: [http://agroeco.info.ru/STATYI/2021/5/st\\_517.pdf](http://agroeco.info.ru/STATYI/2021/5/st_517.pdf). Data obrashcheniya 06.01.2025 g. DOI: <https://doi.org/10.51419/20215517> (in Russ.)

14. Kaur, I. *Seaweeds: Soil Health Boosters for Sustainable Agriculture*. In: Giri, B., Varma, A. (eds) *Soil Health. Soil Biology*. 2020. V. 59. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_10)

15. Abobatta W.F. *Seaweed Extract as a Tool for Sustainable Agriculture* // *JOJ Horticulture* 2024. 4(2): JOJHA.MS.ID.555634 DOI: 10.19080/JOJHA.2023.04.555634

16. MacKinnon S.A., Craft C.A., Hiltz D., Ugarte R. *Improved methods of analysis for betaines in *Ascophyllum nodosum* and its commercial seaweed extracts* // *J. Appl. Phycol.* 2010. V. 22 P. 489–494.

17. Chen S.K., Edwards C.A., Subler S. *The influence of two agricultural biostimulants on nitrogen transformations, microbial activity, and plant growth in soil microcosms* // *Soil Biol. Biochem.* 2003.–35. –P. 9–19.

18. Nakvasina E.N., Lyubova S.V. *Pochvovedenie: uchebn. Posobie* [Soil Science: textbook. Stipend]. Arhangel'sk: SAFU, 2016. 146 s. (in Russ.)

19. Misnikov O.S. *Fiziko-himicheskie osnovy torfyanogo proizvodstva: uchebnoe posobie* [Physico-chemical fundamentals of peat production: training manual] / O.S. Misnikov, O.V. Puhova, E.Yu. Chertkova. Tver': Tverskoj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet = Tver: Tver State Technical University. 2015. 168 p. (in Russ.)

20. Luo, X., Wu, Y., Wang, S. et al. *Frontier review of key reduction technologies and resource utilization of waste during the seaweed gel production process* // *Blue Biotechnology*. 2024; 1: 12 <https://doi.org/10.1186/s44315-024-00013-7>

21. Torres, M.D., Kraan, S. & Domínguez, H. *Seaweed biorefinery* // *Rev Environ Sci Biotechnol.* 2019; 18: 335–388 <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09496-y>

22. Sushri S.B., Elavarasan K., Safeena M.P., Devi H.M., Tejal C.S. *Valorisation of Seaweed Waste from Agar Processing Industry*. *Examines Mar Biol Oceanogr.* 2023; 5(3): 614 EIMBO. DOI: 10.31031/EIMBO.2023.05.000614

23. López-Mosquera E., Fernández-Lema E., Villares R., Corral R., Alonso B., Blanco C. *Composting Fish Waste and Seaweed to Produce a Fertilizer for use in Organic Agriculture* // *Procedia Environmental Sciences*. 2011; 9: 113–117. DOI- 10.1016/j.proenv.2011.11.018

24. Michalak I., Tuhy Ł., Chojnacka K. *Co-Composting of Algae and Effect of the Compost on Germination and Growth of *Lepidium sativum** // *Pol. J. Environ. Stud.* 2016; 25, 3: 1107–1115. DOI: 10.15244/pjoes/61795

25. Cole A.J., Roberts D.A., Garside A.L. et al. *Seaweed compost for agricultural crop production* // *J. Appl. Phycol.* 2016; 28: 629–642 <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0544-2>

26. Konovalova D.A., Ponomarev D.D., Bratilova N.P., Korotkov A.A., Mantulina A.V. *Vyrashchivanie seyancev sosny kedrovoj sibirskoj s zakrytoj krnevoj sistemoj na eksperimental'nyh substratah* [Cultivation of Siberian cedar pine seedlings with a closed root system on experimental substrates] // *Hvojnye boreal'noj zony = Conifers of the boreal zone* 2023; XLI, 5: 379–383 DOI: 10.53374/1993-0135-2023-5-379-383 (in Russ.)

27. *Substraty torfyano-perlitnye tekhnicheskie usloviya TU BY 100061961.002-2015* [Peat-pearlite substrates technical specifications of TU BY 100061961.002-2015] Utv. Pervyj zamestitel' Ministra Ministerstva lesnogo hozjajstva Respubliki Belarus' A. A. Kulik = Technical specifications for peat-perlite substrates TU BY 100061961.002-2015 31.03.2015 g. <https://mlh.by/lioh/2015-5/3.pdf> (in Russ.)

28. Nakvasina E.N. *Ritmika rosta seyancev sosny i eli. Bioekologicheskoe obosnovanie agrotekhniki vyrashchivaniya* [The rhythm of growth of pine and spruce seedlings. Bioecological justification of agricultural cultivation techniques.]. Arhangel'sk, 2016. 158 p. (in Russ.)

### Сведения об авторах

*Накvasина Елена Николаевна* - доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>, e-mail: [e.nakvasina@narfu.ru](mailto:e.nakvasina@narfu.ru).

*Никитина Мария Викторовна* – кандидат химических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8056-8944>, e-mail: [m.nikitina@narfu.ru](mailto:m.nikitina@narfu.ru)

*Романов Евгений Михайлович* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002. ORCID: <https://orcid.org/000-0002-8225-1991>, e-mail: [e.romanov@narfu.ru](mailto:e.romanov@narfu.ru).

*Коптев Сергей Викторович* – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоводства и лесоустройства, Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002, главный научный сотрудник ФБУ Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: [s.koptev@narfu.ru](mailto:s.koptev@narfu.ru).

### Information about the authors

*Elena N. Nakvasina* – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Forestry and Forest Management, Higher School of Natural Sciences and Technologies, Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, nab. Severnaya Dvina 17, Arkhangelsk, Russia, 163002, ORCID: 0000-0002-7360-3975, e-mail: [e.nakvasina@narfu.ru](mailto:e.nakvasina@narfu.ru)

*Maria V. Nikitina* – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Chemistry of the Higher School of Natural Sciences and Technologies of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, nab. Severnaya Dvina 17, Arkhangelsk, Russia, 163002, ORCID: 0000-0002-8056-8944 e-mail: [m.nikitina@narfu.ru](mailto:m.nikitina@narfu.ru)

*Evgeny M. Romanov* – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Management, Higher School of Natural Sciences and Technologies, Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, nab. Severnaya Dvina, 17, Arkhangelsk, Russia, 163002. ORCID: 000-0002-8225-1991, e-mail: [e.romanov@narfu.ru](mailto:e.romanov@narfu.ru)

*Sergey V. Koptev* – Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Department of Forestry and Forest Management, Higher School of Natural Sciences and Technologies of the Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoi Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 Russian Federation, chief researcher Northern Research Institute of Forestry, Nikitova Str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: [s.koptev@narfu.ru](mailto:s.koptev@narfu.ru).

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/3>

УДК 630:631.484:581.93



## Влияние фитоценоза на пространственную изменчивость запасов углерода в лесных почвах Центральной лесостепи

Татьяна Л. Шешницан, [tatianasheshnitsan@gmail.com](mailto:tatianasheshnitsan@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0006-2288-4929>

Сергей М. Матвеев, [lisovod@bk.ru](mailto:lisovod@bk.ru) <https://orcid.org/0000-0001-8532-1484>

Сергей С. Шешницан [sheshnitsan@gmail.com](mailto:sheshnitsan@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-8027-855X>

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Исследование посвящено изучению закономерностей пространственного распределения углерода органических веществ в верхнем минеральном слое лесных почв лесостепной зоны Воронежской области. Проведен системный отбор проб почв на глубину 0–10 сантиметров с учётом парцеллярной структуры двух контрастных лесных фитоценозов: соснового бора (*Pinus sylvestris* L.) с участием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и полидоминантного лиственного леса с дуба черешчатого (*Q. robur* L.), клена остролистного (*Acer platanoides* L.) и липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.). Анализ химического состава почв проводился методом высокотемпературного каталитического сжигания для определения содержания углерода. Полученные данные показывают, что содержание углерода в серогумусовых почвах, сформировавшихся под фитоценозом хвойного леса, варьирует преимущественно от 1,5 до 2,0 %, тогда как в серогумусовых глееватых почвах дубравы достигает 2,8–3,0 %. Максимальные показатели запасов углерода, до 25 тС/га, выявлены на участках дубравы. При сравнении нескольких групп парцелл в пределах каждого насаждения достоверных различий не обнаружено ( $p > 0,05$ ). Выявлена лишь тенденция к повышению запасов углерода при увеличении участия лиственных пород в составе древостоя. Показано также, что запасы углерода в почвах в пределах тессеры изменяются лишь незначительно при переходе от зоны ствола к межкроновому пространству, при этом не выявлены достоверные различия между приствольными, подкroновыми и межкroновыми участками. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что преобладание определенных видов древесных пород и связанных с ними кустарников подлеска и живого напочвенного покрова влияет на общий диапазон колебаний содержания и запасов углерода, однако не дает оснований говорить о четком закономерном распределении запасов углерода в почвах в пределах отдельных парцелл.

**Ключевые слова:** углерод органического вещества почвы, лесные почвы, лесостепная зона, структура фитоценоза, парцеллярная организация, тессеры, пространственное распределение.

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000012-7 «Биогеохимический мониторинг цикла углерода в природных и антропогенных экосистемах Воронежской области в условиях глобального изменения климата (FZUR-2023-0001)».

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Шешницан Т.Л. Влияние фитоценоза на пространственную изменчивость запасов углерода в лесных почвах Центральной лесостепи / Т.Л. Шешницан, С.М. Матвеев, С.С. Шешницан // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 38-58. – Библиогр.: с. 51-57 (46 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/3>

Поступила 21.12.2024. Пересмотрена 23.01.2025. Принята 2.03.2025. Опубликована онлайн 24.03.2025.

## Influence of the phytocoenosis on the spatial variability of carbon stocks in forest soils of the Central Forest-Steppe

Tatiana L. Sheshnitsan, [tatianasheshnitsan@gmail.com](mailto:tatianasheshnitsan@gmail.com)  <https://orcid.org/0009-0006-2288-4929>

Sergey M. Matveev, [lisovod@bk.ru](mailto:lisovod@bk.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-8532-1484>

Sergey S. Sheshnitsan , [sheshnitsan@gmail.com](mailto:sheshnitsan@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0002-8027-855X>

*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

### Abstract

The study focuses on investigating the patterns of spatial distribution of organic carbon in the upper mineral layer of forest soils within the forest-steppe zone of the Voronezh Region. A systematic soil sampling at a depth of 0–10 cm was carried out, taking into account the parcel structure of two contrasting forest phytocoenoses: a pine stand (*Pinus sylvestris* L.) with the participation of common oak (*Quercus robur* L.) and a polydominant broadleaf forest composed of common oak (*Q. robur* L.), Norway maple (*Acer platanoides* L.), and small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.). The chemical analysis of the soils was conducted by means of high-temperature catalytic combustion to determine the carbon content. The obtained data indicate that carbon content in gray-humus soils formed under the coniferous forest phytocoenosis mainly varied from 1,5 % to 2,0 %, whereas in the gray-humus gleyic soils of the oak forest it reaches 2,8 %–3,0 %. The maximum carbon stocks, reaching up to 25 t C / ha, were recorded in oak forest sites. A comparison of several parcel groups within each stand revealed no statistically significant differences ( $p > 0,05$ ). Only a trend toward increased carbon stocks was observed with a greater proportion of broadleaf species in the tree layer. It was also shown that carbon stocks in soils within a tessera vary slightly from trunk-adjacent to inter-crown areas with no statistically significant differences identified among trunk, under-crown, and inter-crown zones. The findings suggest that the dominance of certain tree species together with their associated shrub understory and herbaceous ground cover affects the overall range of fluctuations in carbon content and stocks in soils but does not provide evidence of a clear pattern in carbon stock distribution within individual parcels.

**Keywords:** soil organic carbon, forest soils, forest-steppe zone, phytocoenosis structure, parcel organization, tesserae, spatial distribution.

**Funding:** the study was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 1023013000012-7 “Biogeochemical monitoring of the carbon cycle in natural and anthropogenic ecosystems of the Voronezh region under conditions of global climate change (FZUR-2023-0001)”)

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Sheshnitsan T.L., Matveev S.M., Sheshnitsan S.S. (2025). Influence of the phytocoenosis on the spatial variability of carbon stocks in forest soils of the Central Forest-Steppe. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 38-58 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/3>.

*Received* 21.12.2024. *Revised* 23.01.2025. *Accepted* 2.03. 2025. *Published online* 24.03.2025.

### Введение

Начиная с последней четверти XX века глобальная температура поверхности Земли растет стремительнее, чем за последние два тысячелетия. Такие изменения связаны, прежде всего, с антропогенным повышением концентрации диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ) и закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) в атмосфере [1]. Увеличение использования ископаемого топлива, интенсификация сельского хозяйства, вырубка и сжигание лесов приводит к повышенным выбросам диоксида углерода [2], который в большей мере, чем другие газы, способствует усилению парникового эффекта. В целях смягчения последствий глобального изменения климата было предложено несколько стратегий секвестрации углерода. Биотическая оказалась предпочтительней, так как она основана на фундаментальном процессе – фотосинтезе зеленых растений и предполагает перевод атмосферного углерода с помощью фитocenозов в пулы углерода наземных экосистем [3]. Однако в условиях меняющегося климата важно оценить не только вклад растительности как единой саморегулирующейся системы на запасы углерода в почвах, но также, учитывая мозаичное строение лесного биогеоценоза, выявить внутрибиогеоценозические связи в системе растение–почва, которые будут способствовать более глубокому пониманию влияния типа леса на пул почвенного углерода. Так, например, запасы углерода в верхних 30 см лесных почв могут в два-четыре раза превышать пул углерода фитомассы, а в полуметровой толще – в три-шесть раз [4].

Лесной биогеоценоз представляет собой открытую систему с присущими ей циклическими процессами, связанными с сукцессионными сменами, разновозрастной и многовидовой структурой древостоя, что затрудняет достоверное определение баланса углерода в условиях неоднородности растительного сообщества. Поэтому целесообразно рассматривать парцеллу как единицу горизонтального расчленения биогеоценозического покрова [5], которая позволяет уточнить влияние современного типа фитocenоза на пространственную вариабельность углерода в почвах.

Организатором парцеллярного строения является эдификатор, вокруг которого формируется

мощное фитогенное поле [6]. Его биологические особенности определяют уровень накопления и долговечность хранения органического вещества в фитомассе. Некоторые исследователи рассматривают биокосный компонент как горячую точку биогеохимических изменений [7], в пределах которой изменяются количество подстилки, физико-химические свойства осадков, плотность тонких корней, содержание гумуса, обменных катионов, pH, заселенность почв фауной и микрофлорой [8–13], что, в свою очередь, влияет на дифференциацию почвенного покрова [14]. Как правило, пул общего углерода увеличивается с возрастом древостоя и тесно связан с продуктивностью биогеоценоза [15–18].

Многие исследователи отмечают высокий уровень содержания углерода органического вещества в почвах под спелыми насаждениями, по сравнению с молодняками [19–21]. Однако не только возраст, но и вид, а также различные стадии развития древесных насаждений и изменения глубины почвы могут оказывать влияние на запасы органического углерода [22].

М. А. Подвезенная и И. М. Рыжова (2010) [23], исследуя парцеллярное строение лесных экосистем южной тайги, нашли связь между напочвенной растительностью и почвой только для верхнего 5-ти-сантиметрового слоя. Л. О. Карпачевский и др. (2009) [10] отмечает, что влияние современного биогеоценоза на почву достоверно лишь для слоя 0-15 см. Это согласуется с данными многочисленных зарубежных исследований, посвященных влиянию смешанных и чистых насаждений, а также отдельных видов древесных пород на запасы органического углерода в верхних горизонтах почв (в слое 0-20 см) [24–28]. Таким образом, можно предположить, что именно характеристики насаждений определяют пространственную вариабельность органического углерода в почвах [29]. Исследования, проведенные на ненарушенных лесных территориях, продемонстрировали статистически значимую влияние дуба на повышенное содержание органического углерода в верхнем минеральном горизонте почв по сравнению с участками, где преобладающим видом выступает клен [30]. Несмотря на полученные результаты, в научной среде до сих пор от-

существует единая точка зрения относительно влияния различных древесных пород на суммарные запасы органического углерода в верхнем слое почвы [24, 31–33]. Анализ многочисленных исследований показал, что, как правило, увеличение содержания органического углерода в верхнем слое почв противоположно их ранжированию для лесной подстилки [31, 33–36]. Многие авторы считают, что на пул углерода в верхнем слое минеральной почвы большее влияние оказывает тип почвы или климат, чем вид дерева, в то время как влияние древесных пород на пул углерода в подстилке более выражено [26, 31].

Целью исследования являлось изучение влияния парцеллярной и внутрипарцеллярной структуры разных типов лесных фитоценозов (дубрава, сосновый бор) лесостепной зоны Воронежской области на пространственное распределение содержания и запасов углерода в верхнем минеральном слое почв.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследований*

Исследуемая территория расположена в южной части Окско-Донской низменности между двумя водоразделами – Дон-Воронежским и Воронеж-Усманским в черте города Воронеж. Правобережные леса представлены нагорными дубравами на приводораздельных склонах и частично на водоразделе Воронеж-Дон с абсолютными отметками 155–165 м. Левый берег р. Воронеж отделен от правобережья широкой поймой со старицами и заболоченными участками. На левобережных террасах высотой 103–122 м над уровнем моря сформировались светлохвойные сосновые боры. Климат умеренно-континентальный, характеризуется значительными колебаниями температуры и осадков. Среднегодовая температура воздуха +7,6 °С. Средняя температура июля и января +21,3 °С и –6,0 °С соответственно. Среднегодовое количество осадков за последние 30 лет составляет 586 мм, причем на летне-осенний период приходится около 54,5 % годовой нормы.

Формирование гранулометрического состава почв в исследуемом районе в значительной мере обусловлено разнородными песками, слагающими левобережные надпойменные террасы. В

свою очередь, именно эти почвообразующие породы стали основой для формирования серогумусовых иллювиально-ожелезненных бескарбонатных почв на аллювиальных песчано-супесчаных отложениях в левобережных сосновых борах. Профиль почвы состоит из следующих горизонтов: Ad (0–8 см) – АУ1 (8–18 см) – АУ2 (18–40 см) – Сf (40–70 см) – С (>70 см). Верхний горизонт (Ad) представлен дерниной, густо пронизанной корнями растений. Под ним залегает буровато-серый супесчаный горизонт АУ1, влажный, рыхлый, пористый, с непрочной комковатой структурой. Он заметно отличается по цвету от нижележащего горизонта АУ2, охристого, также супесчаного, рыхлого и пористого, содержащего гумусовые затёки и рыжие пятна иллювиирования органо-железистых соединений. В АУ2 отмечается наличие корней растений, а его переход к следующему горизонту постепенный. Горизонт Сf, залегающий с 40 см, имеет ржаво-жёлтую окраску, бесструктурный, песчаный, рыхлый и пористый, с единичными ржавыми пятнами иллювиирования органо-железистых соединений и редкими корнями растений. Ниже 70 см этот горизонт сменяется почвообразующей породой, представленной светло-жёлтым, свежим, бесструктурным, рыхлым и пористым песком. Вскипание от НС1 по всему профилю отсутствует. Гранулометрический состав верхних 10 см почв характеризуется преобладанием песчаной фракции (89 %) и незначительной долей пылевой (9 %) и илстой фракции (2 %).

На участках нагорной дубравы в правобережье профиль почв более сложный, имеет отчётливую иллювиальность и отличается менее однородным гранулометрическим составом. Здесь, в частности, сформировались серогумусовые глееватые бескарбонатные маломощные супесчаные почвы. Профиль почвы сформирован следующими горизонтами: АУ (1–16 см) – АУg (16–35 см) – АУСg (35–90 см) – Сg (>90 см). Верхний горизонт АУ представлен влажным, серым, супесчаным материалом с рыхлой, пористой структурой. Он непрочной мелкокомковатый, обильно пронизан корнями растений. Ниже залегает горизонт АУg, имеющий грязно-серую с оливковым оттенком окраску, супесчаный, рыхлый, пористый, с непрочной мелкокомковатой структурой, содержит гумусовые затёки и корни

растений. Переход к следующему горизонту постепенный. Горизонт АУСg, залегающий на глубине 35–90 см, обладает оливково-светло-бурой окраской. Он бесструктурный, песчаный, рыхлый, пористый, с единичными сизыми пятнами оглеения, присутствием Mn-Fe конкреций и редких корней растений. Постепенно он сменяется горизонтом Сg, расположенным ниже 90 см. Этот слой представлен белесым, бесструктурным, рыхлым и пористым песком, содержащим многочисленные сизые пятна оглеения. Вскипание от HCl по всему профилю также отсутствует. В гранулометрическом составе верхнего 10-сантиметрового слоя почв преобладает песчаная фракция (82%), однако вклад пыли и глины несколько выше, чем в почвах хвойного леса, и составил 15 и 3% соответственно.

Для оценки свойств почв и характеристик лесных насаждений были заложены пробные площади (ПП) размером 50×50 м (0,25 га) в спелых и перестойных древостоях. Одна из таких площадей (ПП № 3-1) расположена в квартале № 60 (выдел 11) Левобережного участкового лесничества, а другая (ПП № 6-1) – в квартале № 47 (выдел 3) Правобережного участкового лесничества Пригородного лесничества Воронежской области. Исследуемые участки лесных экосистем характеризуют наиболее распространённые типы лесорастительных условий – сосняк травяной с дубом, В<sub>2</sub> (ПП № 3-1) и дубняк осоко-снытьевый, С<sub>2</sub>D (ПП № 6-1). Сосновые насаждения (состав 10С) представлены древостоями искусственного происхождения I класса бонитета с примесью дуба. Возраст насаждения составляет 110 лет, средний диаметр стволов на высоте 1,3 м – 35,8 см, а средняя высота достигает 28,6 м. Запас древесины – 424 м<sup>3</sup>/га при полноте 1,0. Подлесок в основном представлен малиной обыкновенной (*Rubus idaeus*). В напочвенном покрове преобладают зелёные мхи (*Dicranum* sp.), вейник наземный (*Calamagrostis epigejos*), мятлик боровой (*Poa nemoralis*), марьянник луговой (*Melampyrum pratense*), ландыш майский (*Convallaria majalis*) и купена многоцветковая (*Polygonatum multiflorum*). Нагорная дубрава сформирована лиственными полидоминантными древостоями характеризуется сложным составом (ЗД5ЛП2КЛЮ) порослевого про-

исхождения III класса бонитета, при этом запас древесины составляет 270 м<sup>3</sup>/га, а полнота – 0,8. Возраст насаждения составляет 100 лет, средние значения диаметра стволов и высоты деревьев составляют соответственно 24,6 см и 22,6 м. В насаждении происходит замещение дуба черешчатого (*Quercus robur*) главным образом клёном остролистным (*Acer platanoides*), а также липой сердцевидной (*Tilia cordata*), встречается ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*). Подрост представлен кленом остролистным и ясенем обыкновенным, подлесок сформирован лещиной обыкновенной (*Coryllus avellana*) и кленом полевым (*A. campestre*). В напочвенном покрове преобладает осока волосистая (*Carex pilosa*), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria*), будра плющевидная (*Glechoma hederacea*), недотрога мелкоцветковая (*Impatiens parviflora*), звездчатка ланцетовидная (*Stellaria holostea*).

### Дизайн эксперимента

Для выделения парцелл использованы методические подходы Н.В. Дылиса (1969) [5], которые заключаются в определении встречаемости парцелл на равномерно разбросанных точках наблюдения по площади исследуемого участка. В нашем исследовании количество точек наблюдения составило 121, что дает возможность с достаточной точностью определить парцеллярное строение исследуемого участка. Шаг между точками учетов составил 4,5 метра (рис. 1).

Границы парцелл устанавливались по периметру комплекса типичных для конкретной парцеллы микрогруппировок травяного яруса. Названия парцелл даны по видовому составу древостоя, подроста, подлеска, живого напочвенного покрова. Отбор почвенных образцов производился в трехкратной повторности с помощью бура на глубину 0–10 см в 25 точках, равномерно распределённых в пределах пробной площади. Для определения плотности почв отбор проб проводился специальным пробоотборником 70×70 мм из комплекта режущих колец КП-402.

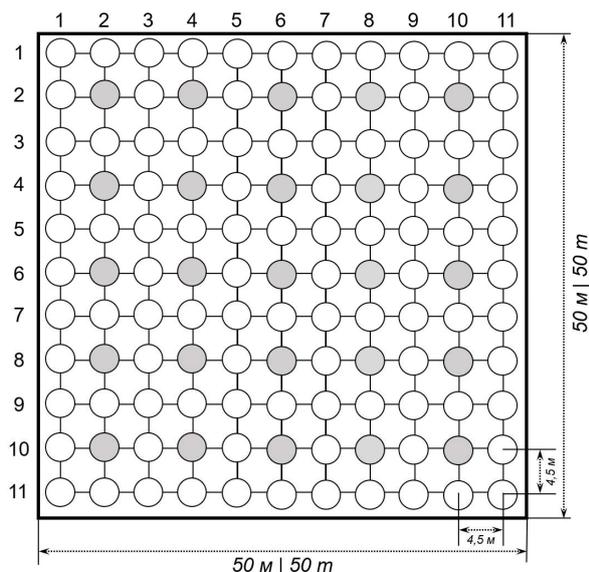


Рисунок 1. Схема пробной площади для учёта парцеллярной структуры фитоценоза: (○) – точки учёта парцеллярной структуры фитоценоза; (●) – точки учёта парцеллярной структуры фитоценоза и отбора проб почв

Figure 1. Schematic of the sample plot to study parcellar structure of phytocenosis: (○) – parcellar structure recording points for phytocenosis; (●) – parcellar structure recording points for phytocenosis and soil sampling sites

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Отбор проб почв по тессерам проводили следующим образом: определяли два соседних дерева преобладающих в насаждении пород, стволы которых находились на расстоянии не менее 6 м друг от друга, после чего прокладывали по прямой линии между ними условную трансекту. Вдоль этой линии последовательно закладывали 5–6 пунктов отбора образцов: приствольную зону (непосредственно у ствола), подкрасную зону (примерно в середине проекции кроны) и межкрасное пространство (так называемое «окно» между кронами). В каждой из выбранных точек предварительно удаляли верхний органический горизонт (подстилку), зафиксировав его характерные морфологические особенности, мощность и состав [23]. Далее осуществляли отбор минерального горизонта почвы почвенным буром на

глубину 10 см. В случае если в древостое отсутствовали выраженные просветы между кронами (например, в нагорной дубраве), пробы почв отбирали только в приствольных и подкрасных участках. В этих же точках проводили отбор проб почв на плотность сложения аналогичным способом как было описано ранее.

Подготовка проб к анализу проводилась в соответствии со стандартными процедурами по ГОСТ 17.4.4.02. Определение содержания общего углерода (%) в пробах осуществляли с использованием элементного анализатора ECS 8024 NC Soil Special (N.C. TECHNOLOGIES SRL, Италия) методом каталитического сжигания пробы в присутствии кислорода при температуре 1000 °С. Калибровку осуществляли по референс-стандарту ацетанилида (Elemental Microanalysis, Великобритания). Каждая проба анализировалась в трёх повторностях. Пересчёт осуществлялся на сухую массу с учётом влажности.

#### Анализ данных

Статистическую обработку данных проводили в прикладном программном пакете STATISTICA 12.5 (StatSoft Inc., 2014). Оценку достоверности различий между средними значениями определяли с использованием *U*-критерия Манна-Уитни при  $p < 0,05$ .

#### Результаты и их обсуждение

В ходе исследования получены данные, характеризующие влияние парцеллярной структуры разных типов лесных насаждений (хвойных, лиственных) на распределение запасов углерода в верхнем минеральном слое почв. В ходе исследования рассмотрено парцеллярное строение наиболее характерных для Центральной лесостепи лесных сообществ с контрастной горизонтальной неоднородностью растительных элементов.

Согласно, анализу полученных данных (табл. 2) в сложении соснового насаждения в разных процентных соотношениях приняло участие 12 парцелл.

Распределение площадей биогеоценологических парцелл в сосновом бору на пробной площади № 3-1

Table 1

Distribution of biogeocoenotic parcels areas in pine forest at sample plot No. 3-1

№ п/п	Парцелла   Parcell	Доля, % Percentage, %	Площадь, м <sup>2</sup> Area, m <sup>2</sup>
1	Сосново-злаково-зеленомошная (Сззм)   <i>Pinetum graminoso-dicranosum</i> (Pgd)	43,8	1095
2	Сосново-злаковая (Сз)   <i>Pinetum graminosum</i> (Pg)	14,9	372
3	Сосново-злаково-ландышево-зеленомошная (Сзлзм)   <i>Pinetum graminoso-convallarioso-dicranosum</i> (Pgcd)	9,1	227
4	Сосново-дубово-злаковая (СДз)   <i>Pino-quercetum graminosum</i> (PQg)	7,4	186
5	Сосново-дубово-злаково-купеново-зеленомошная (СДзкм)   <i>Pino-quercetum graminoso-polygonatoso-dicranosum</i> (PQgpd)	6,6	165
6	Сосново-злаково-ландышевая (Сзл)   <i>Pinetum graminoso-convallariosum</i> (Pgc)	5	124
7	Сосново-дубово-злаково-ландышевая (СДзл)   <i>Pino-quercetum graminoso-convallariosum</i> (PQgc)	3,3	83
8	Сосново-дубово-злаково-зеленомошная (СДззм)   <i>Pino-quercetum graminoso-dicranosum</i> (PQgd)	3,3	83
9	Сосново-ландышево-купеново-зеленомошная (Слкм)   <i>Pinetum convallarioso-polygonatoso-dicranosum</i> (Pcpd)	3,3	83
10	Злаково-ландышево-зеленомошная в окне (Озлзм)   <i>Graminoso-convallarioso-dicranosa in a gap</i> (Ggcd)	1,7	41
11	Малиново-злаковая в окне (Омз)   <i>Rubetoso-graminosa in a gap</i> (Grg)	0,8	21
12	Сосново-вязово-ландышевая (СВл)   <i>Pino-ulmetum convallariosum</i> (PUc)	0,8	21
	Итого   Total	100	2500

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' calculations

В представленном типе леса, парцеллы подразделяются по доминантам растительного компонента, так как данное насаждение является чистым с примесью дуба. Внешний облик биогеоценоза, а также обменные процессы определяют две основные парцеллы – сосново-злаково-зеленомошная (Сззм) и сосново-злаковая (Сз). По занимаемой площади сосново-злаково-зеленомошная (Сззм) парцелла является доминирующей и составляет 43,8 % площади исследуемого участка. Проективное покрытие мха (*Dicranum undulatum*) в напочвенном по-

крове достигает 75 %, а доля участия травяного покрова с преобладанием мятлика борového (*Poa nemoralis*) составила не более 20 %.

Доминантное значение в мохово-лишайниковом ярусе парцеллы занимает дикранум волнистый (*Dicranum undulatum*), который способствует формированию единого фитогенного поля, в пределах которого формируется однонаправленное воздействие на почвенный покров и его свойства [37]. Сосново-злаковая (Сз) парцелла несколько уступает первой и занимает 14,9% площади. Геоботанические

исследования показали, что от предыдущей парцеллы она отличается выраженным злаковым травяным покровом, в котором значительное участие принимают два доминирующих вида – вейник наземный (*Calamagrostis epigeios*) с проективным покрытием 45 % и мятлик боровой (*Poa nemoralis*) – проективное покрытие 40 %.

К дополняющим парцеллам, в составе которых находятся несколько эдификаторов – сосна и дуб, мы относим следующие с соответствующей долей в общей площади: сосново-дубово-злаковая

(СДз) – 7,0 %, сосново-дубово-злаково-купеново-зеленомошная (СДзкзм) – 6,6 %, сосново-дубово-злаково-ландышевая (СДзл) – 3,3 % и сосново-дубово-злаково-зеленомошная (СДззм) – 3,3 %. Однако их суммарное значение (около 20,6 %) может вносить значительный вклад в пространственную структуру лесного насаждения.

Рассмотрим рис. 2, иллюстрирующий парцеллярную структуру фитоценоза соснового бора и пространственное распределение содержания и запасов углерода в верхнем 10-сантиметровом слое почв.

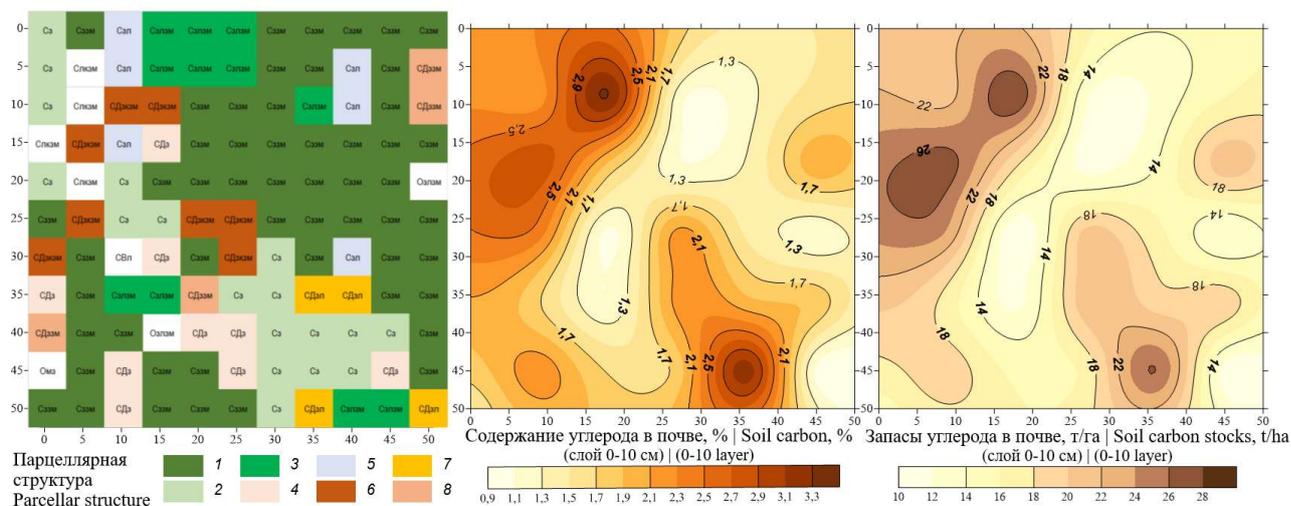


Рисунок 2. Парцеллярная структура фитоценоза, пространственное распределение содержания и запасов углерода в почвах соснового бора. Номера парцелл соответствуют таблице 1

Figure 2. Parcellar structure of phytocoenosis, spatial distribution of carbon content and stocks in soils of pine forest. Parcell numbers correspond to Table 1

Источник: собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

Наглядно видно, что парцеллярная структура характеризуется выраженным мозаичным распределением парцелл, каждая из которых имеет свои специфические черты, определяемые доминирующим растительным компонентом. Анализ карт пространственного распределения содержания и запасов углерода в почвах показывает их значительное сходство: лишь на двух-трёх участках фиксируются значения содержания углерода, превышающие 2,0 %, а запасы углерода достигают более 20 тС/га. На большей площади содержание углерода в верхнем слое почв не превышает 1,8 % (запасы – 18 тС/га).

Сравнение пространственного распределения углерода в почвах с картой распределения парцелл на рис. 1 позволяет предположить, что доминирующая в фитоценозе Сззм соотносится преимущественно с невысокими запасами углерода. Это может быть связано с низкой продуктивностью травяного компонента в парцелле и ограниченным поступлением органического вещества на поверхность почвы, поскольку плотный моховой покров препятствует этому. В отличие от этого, Сз демонстрирует более высокие значения содержания углерода в почве, что может быть следствием продуктивного злакового травяного покрова, и накопление углерода в таких парцеллах может быть связано с более

интенсивным разложением травяного компонента подстилки. Дополняющие парцеллы, такие как сосново-дубовые с различным составом травяного компонента в общей сумме составляют около 20% площади, при этом им соответствуют значения содержания углерода, сопоставимые или несколько превышающие показатели сосново-злаковой парцеллы. Вероятно, наличие дуба в насаждении, несмотря на его относительно небольшую долю и малый размер деревьев, способствует увеличению запасов углерода за счёт значительного объёма опада и более интенсивного процесса гумусообразования.

Заметим, что пространственная неоднородность содержания углерода выражена не только

между различными парцеллами, но и внутри одной парцеллы. Так, зеленомошные парцеллы, несмотря на общее преобладание, демонстрируют вариабельность запасов углерода, что, вероятно, связано с микроклиматическими факторами, а также с локальными особенностями состава подстилки. В травяных парцеллах это влияние может быть ещё более выраженным вследствие меньшей однородности растительного покрова.

При анализе парцеллярной структуры смешанного широколиственного насаждения – дубнякосоко-снытьевый Досн, обращает на себя внимание сложная парцеллярная структура, связанная с разнообразием растительных компонентов (табл. 2).

Таблица 2

Распределение площадей биогеоценологических парцелл в нагорной дубраве на пробной площади № 6-1

Table 2

Distribution of biogeocoenotic parcels areas in upland oak forest at sample plot No. 6-1

№ п/п	Парцелла   Parcell	Доля, % Percentage, %	Площадь, m <sup>2</sup> Area, m <sup>2</sup>
1	Липово-кленово-осоковая (ЛКос)   <i>Tilio-aceretum caricosum</i> (ТАс)	30,6	764
2	Кленово-осоковая (Кос)   <i>Aceretum caricosum</i> (Ас)	14,9	372
3	Липово-кленово-лещиново-осоковая (ЛКлщос)   <i>Tilio-aceretum coryloso-caricosum</i> (ТАсрс)	11,6	289
4	Дубово-кленово-липово-осоково-снытьевая (ДКЛоссн)   <i>Querceto-acero-tilietum caricoso-aegopodiosum</i> (QATса)	8,3	207
5	Липово-осоковая (Лос)   <i>Tilietum caricosum</i> (Тс)	6,6	165
6	Липово-кленово-снытьевая (ЛКсн)   <i>Tilio-aceretum aegopodiosum</i> (ТАа)	6,6	165
7	Липово-кленово-звездчатковая (ЛКз)   <i>Tilio-aceretum stellariosum</i> (ТАс)	5,0	124
8	Липово-дубово-осоковая (ЛДос)   <i>Tilio-quercetum caricosum</i> (ТQс)	3,3	83
9	Кленово-дубово-осоковая (КДос)   <i>Acero-quercetum caricosum</i> (AQс)	3,3	83
10	Липово-кленово-осоково-снытьевая (ЛКоссн)   <i>Tilio-aceretum caricoso-aegopodiosum</i> (ТАса)	3,3	83
11	Кленово-ясенево-осоковая (КЯос)   <i>Acero-fraxinetum caricosum</i> (AFс)	3,3	83
12	Кленово-осоково-снытьевая (Коссн)   <i>Aceretum caricoso-aegopodiosum</i> (Аса)	0,8	21
13	Дубово-осоковая (Дос)   <i>Quercetum caricosum</i> (Qс)	0,8	21
14	Липово-ясенево-звездчатковая (ЛЯсз)   <i>Tilio-fraxinetum stellariosum</i> (TFс)	0,8	21

15	Ясенево-осоковая (Ясос)   <i>Fraxinetum caricosum</i> (Fc)	0,8	21
	Итого   Total	100	2500

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' calculations

Рассматривая, парцеллярное строение насаждения можно выделить три основных парцеллы: липово-кленово-осоковая (ЛКос) 30,6 %, кленово-осоковая (Кос) 14,9 % и липово-кленово-лещиново-осоковая (ЛКлщос) 11,6 %. Необходимо отметить, что данная горизонтальная пространственная структура насаждения в Воронежской нагорной дубраве вызвана деградационными процессами, которые усугубляются активной конкурентной борьбой порослевого дуба с породами-спутниками (липой мелко-

листной, кленом остролистным, ясенем обыкновенным), что крайне препятствует естественному возобновлению дуба под пологом древостоя [38] и ведет к утрате его доминирующей роли в составе древесного яруса. Так, доля дополняющих парцелл с участием дуба составляет всего 15,7 % общей площади.

На рис. 3 представлена парцеллярная структура фитоценоза нагорной дубравы и пространственное распределение содержания и запасов углерода в верхнем 10-сантиметровом слое почв.

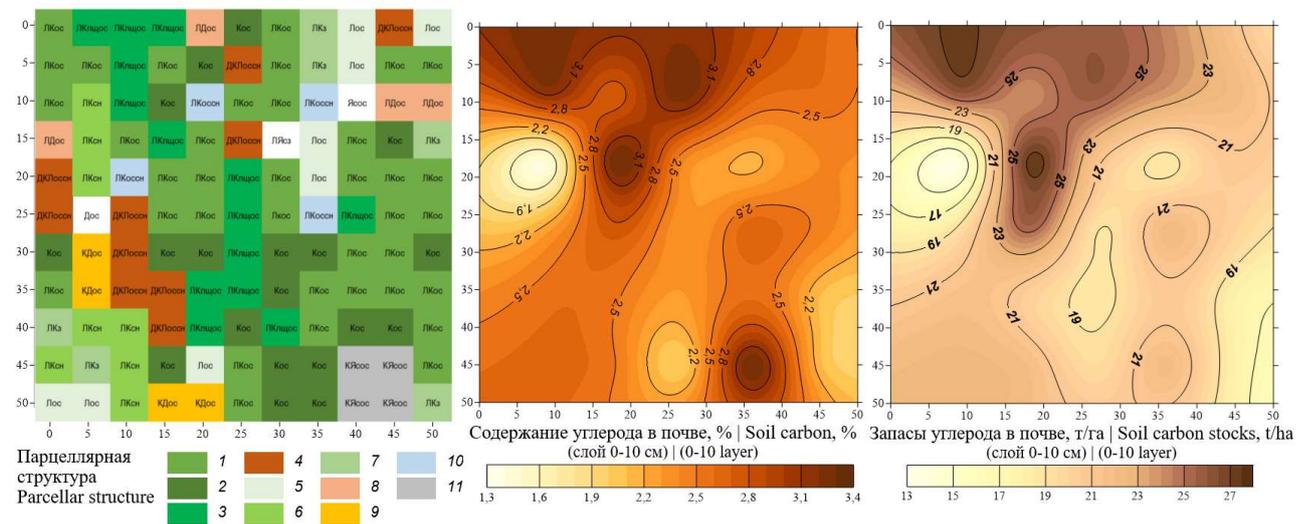


Рисунок 3. Парцеллярная структура фитоценоза, пространственное распределение содержания и запасов углерода в почвах нагорной дубравы. Номера парцелл соответствуют таблице 2

Figure 3. Parcellar structure of phytocoenosis, spatial distribution of carbon content and stocks in soils of upland oak forest. Parcell numbers correspond to Table 2

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Очевидно, что парцеллярная структура дубравы отличается высокой сложностью и очень выраженной мозаичностью. Сопоставление карт пространственного распределения содержания углерода и углеродных запасов показывает, что максимальные значения углерода характерны для участков с густым подростом клёна и подлеском из лещины. На таких участках содержание углерода составляет более 2,8 %, а запасы превышают 25 тС/га.

В то же время на значительной части площади содержание углерода варьирует от 1,8 до 2,5 % (запасы – от 13 до 23 тС/га).

Сравнение пространственного распределения углерода в почвах с картой парцеллярной структуры на рисунке 3 показывает, что высокие значения содержания и запасов углерода характерны для липово-кленовых парцелл (ЛКос, Лклщос), занимающих более 40 % площади. Это может быть связано с высокой продуктивностью липы и клёна, а также

значительным объёмом опада, который активно разлагается, способствуя накоплению органического вещества в почве. Кроме того, локальный густой подрост лещины создаёт благоприятные условия для накопления углерода в почве. На участках кленово-осоковых (*Кос*) парцелл содержание углерода ниже. Это может быть обусловлено слабым развитием или отсутствием подроста и подлеска в этой парцелле, что приводит к меньшему объёму опада, поступающего на поверхность почвы. Участки с парцелл с участием дуба в качестве соэдификатора (*ДКЛосн*, *ЛДос*), несмотря на их относительно небольшую площадь, иногда также демонстрируют повышенные значения запасов углерода в почвах.

Липово-кленово-осоковые участки, несмотря на доминирование, демонстрируют заметную вариативность содержания углерода, что, вероятно, связано с локальными особенностями плотности дре-

весного покрова, состава подстилки и микроклиматических условий. В парцеллах с густым кленовым подростом и подлеском лещины содержание углерода может возрасти, в то время как на участках с травяным компонентом неоднородность содержания углерода может быть более выраженной. Дегра- дация дуба и утрата его доминирующего положения в составе древесного яруса, замещение его клёном и липой изменяет пространственное распределение углерода, снижает вклад дубовых парцелл в формирование пула углерода в почвах.

Статистический анализ данных, результаты которого обобщены в табл. 3, демонстрирует отсутствие статистически достоверных различий в содержании и запасах углерода в почвах между группами парцелл. Однако можно отметить определённые тенденции, которые прослеживаются в условиях двух контрастных типов леса.

Таблица 3

Статистические данные по содержанию и запасам углерода в лесных почвах (слой 0-10 см), соответствующих участкам парцелл

Table 3

Statistical data on carbon content and stocks in forest soils (0-10 cm layer) corresponding to parcel areas

Тип лесного биогеоценоза Forest type	Парцеллы   Parcels	C, %		Запасы углерода, кгС/м <sup>2</sup> Carbon stocks, kgC/m <sup>2</sup>	
		M±SD	min-max	M±SD	min-max
Сосновый бор   Pine forest	Зеленомошные (Сззм, Сзлзм, Слкзм) <i>Dicranosus</i> (Pgd, Pgcd, Pcpd)	1,89±0,62	1,05-3,19	1,81±0,51	1,03-2,68
	Травяные (Сз, Сзл)   <i>Herbaceous</i> (Pg, Pgc)	1,48±0,35	1,14-1,83	1,57±0,40	1,12-1,92
	Дубовые (СДз, СДзкм, СДзл, СДззм) <i>Quercosus</i> (PQg, PQgpd, PQgc, PQgd)	1,81±0,78	1,06-3,29	1,72±0,58	1,13-2,73
Нагорная дубрава   Upland oak forest	Липово-кленовые (ЛКос, ЛКлшос, ЛКсн, ЛКз, ЛКосн)   <i>Tilio-acerosus</i> (TAc, TAcrc, TAc, TAcA)	2,56±0,45	1,44-3,28	2,13±0,30	1,38-2,71
	Кленовые (Кос, Косн)   <i>Acerosus</i> (Ac, AcA)	2,28±0,20	2,10-2,50	1,96±0,20	1,79-2,19
	Дубовые (ДКЛосн, ЛДос, КДос, Дос)   <i>Quercosus</i> (QATca, TQc, AQc, Qc)	2,63±0,44	2,17-3,26	2,26±0,34	1,86-2,57

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' calculations

Для дубняка осоко-снытьевого (Д<sub>осн</sub>) высокие значения содержания углерода наблюдаются в липово-кленовых парцеллах (2,56±0,45 %). В свою очередь, дубовые парцеллы, несмотря на их меньшую площадь, демонстрируют сопоставимые значения содержания углерода (2,63±0,44 %). Кленовые парцеллы показывают несколько более низкие значения содержания углерода (2,28±0,20 %) и запасов (1,96±0,20 кгС/м<sup>2</sup>).

В сосняке травяном с дубом (С<sub>срт</sub>) выделяются зеленомошные парцеллы (С<sub>ззм</sub>, С<sub>злзм</sub>, С<sub>лкзм</sub>) с содержанием углерода 1,89±0,62 % и запасами 1,81±0,51 кгС/м<sup>2</sup>. Это можно объяснить особенностями мохового покрова, который, хотя и способствует стабилизации органического вещества, ограничивает поступление опада на поверхность почвы, что снижает общую продуктивность углеродных пулов. Травяные парцеллы в сосняке (С<sub>з</sub>, С<sub>зл</sub>) в среднем характеризуются ещё более низкими значениями содержания углерода (1,48±0,35 %) и запасов (1,57±0,40 кгС/м<sup>2</sup>).

Отсутствие статистически значимых различий между парцеллами может быть связано с несколькими причинами. Во-первых, углеродные процессы в почве зависят не только от растительного состава, но и от множества факторов, таких как микроклимат, свойства почв. Во-вторых, вариабельность данных внутри каждой группы парцелл может быть обусловлена локальными особенностями среды, включая влажность, освещённость и активность почвенной микрофлоры, сукцессионными процессами.

Данные, представленные в табл. 4, позволяют провести анализ содержания и запасов углерода в лесных почвах (слой 0–10 см) в зависимости от микрозон тессеры. Этот подход позволяет оценить, как изменяется углеродный статус в почвах под фитогенным полем одного вида дерева. Следует отметить, что исследование микрозон тессеры – приствольной, подкрановой и межкрановой – даёт возможность проследить закономерности распределения углерода, обусловленные взаимодействием эдификатора и почвы на локальном уровне.

Таблица 4

Статистические данные по содержанию и запасам углерода в лесных почвах (слой 0-10 см) в разных микрозонах тессеры

Table 4

Statistical data on carbon content and stocks in forest soils (0-10 cm layer) in different tessera microzones

Тип лесного биогеоценоза Forest type	Древесная порода   Tree species	Микрозоны тессеры   Tessera microzones	C, %		Запасы углерода, кгС/м <sup>2</sup> Carbon stocks, kgC/m <sup>2</sup>	
			M±SD	min-max	M±SD	min-max
Сосновый бор   Pine forest	Сосна   Pine	ПС   NT	3,60±1,66	2,44-5,51	3,78±2,18	2,13-6,26
		ПК   SC	2,62±0,31	2,30-2,91	2,73±0,35	2,33-3,02
		МК   IC	2,37±0,45	1,89-2,78	2,67±0,62	2,03-3,28
	Сосна и дуб Pine and oak	ПС   NT	3,07±0,72	2,33-3,78	3,18±0,91	2,32-4,14
		ПК   SC	2,95±0,29	2,66-3,24	3,51±0,66	2,75-3,92
		МК   IC	2,14±0,25	1,92-2,41	2,57±0,31	2,28-2,91
Нагорная дубрава Upland oak forest	Липа   Linden	ПС   NT	3,05±0,14	2,95-3,15	3,42±0,55	3,04-3,81
		ПК   SC	2,89±0,40	2,61-3,18	3,02±0,28	2,82-3,22
		МК   IC	2,48	–	2,80	–

Клен   Marple	ПС   NT	3,03±0,19	2,90-3,16	3,45±0,28	3,25-3,66
	ПК   SC	2,75±0,54	2,37-3,13	2,93±0,64	2,48-3,39
	МК   IC	2,64	–	2,77	–
Дуб   Oak	ПС   NT	2,53±0,05	2,50-2,57	2,53±0,01	2,52-2,54
	ПК   SC	2,43±1,47	1,39-3,48	2,64±1,73	1,41-3,86
	МК   IC	2,34±0,75	1,81-2,87	2,43±0,73	1,92-2,95

Примечание – Микрозоны тессеры: ПС – приствольный участок, ПК – подкрановое пространство, МК – межкрановое пространство. Статистически значимые различия ( $p < 0,05$ ) между парцеллами в пределах одного типа леса отмечены (\*)

Note - Tessera microzones: NT – near trunk, SC – subcrown area, IC – intercrown area. Statistically significant differences ( $p < 0,05$ ) between parcels within the same forest type are marked (\*)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' calculations

В условиях хвойного леса ( $C_{срт}$ ) в приствольной зоне сосны содержание углерода в почвах, как правило, достигает максимальных значений ( $3,60 \pm 1,66$  %), варьируя от 2,4 до 5,51 %. В этой микрозоне происходит значительное накопление древесного опада, в том числе за счёт коры («приствольные повышения»). В подкрановых участках, находящихся в границах проекции кроны, содержание углерода несколько в среднем снижается до  $2,62 \pm 0,31$  %, при этом диапазон варьирования оказывается более узким: от 2,30 до 2,91 %. Здесь влияние дерева на почвенные процессы определяется преимущественным поступлением опада хвои. В межкрановой зоне, расположенной за пределами кроны, содержание углерода минимально ( $2,37 \pm 0,45$  %), что, очевидно, связано с ограниченным поступлением опада. Аналогичное распределение наблюдается и для запасов углерода, средние значения которого также убывают в последовательности (в  $kgC/m^2$ ): ПС (3,78) > ПК (2,73) > МК (2,67). Радиально-концентрическое перекрытие фитогенных полей сосны (главного эдификатора) и дуба черешчатого нарушает эту последовательность и характеризуется увеличением запасов углерода в подкрановых пространствах. В дубняке осоко-снытьевом ( $D_{осн}$ ) содержание углерода в среднем убывает также в классической последовательности по мере удаления от ствола у всех видов древесных пород, однако запасы углерода в почве в пределах фитогенного поля дуба характеризовались близкими средними значениями. Отметим также, что в условиях

высокой сомкнутости крон деревьев межкрановые участки либо не выделялись, либо соотносились с границей проекции кроны дерева.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что строгих статистически подтвержденных закономерностей в изменении углеродных пулов между парцеллами и микрозонами тессер не выявлено. При этом, можно отметить определённые тенденции, связанные с влиянием пространственной структуры фитоценоза на распределение углерода в лесных почвах. Высокая вариабельность данных внутри каждой группы парцелл может быть связана с локальными особенностями среды, включая уровень увлажнения, освещённости, активность почвенной микробиоты и сукцессионные процессы. Эти результаты отражают сложный характер взаимодействия биотических и абиотических факторов и хорошо согласуются с выводами, сделанными в аналогичных исследованиях [9, 39], в которых подчёркивалась значимость совместного влияния растительности и микроклиматических условий.

Особого внимания заслуживает анализ пространственной изменчивости запасов углерода в пределах микрозон тессеры. Согласно полученным данным, в приствольных зонах, где наблюдается максимальная интенсивность влияния деревьев, запасы углерода достигают наибольших значений. Здесь создаются благоприятные условия для накопления органического вещества за счёт обильного опада. Напротив, в межкрановых зонах влияние де-

ревьев ослабевает, что приводит к снижению запасов углерода. Данная закономерность подтверждается исследованиями, описывающими радиально-концентрическую дифференциацию запасов углерода в пределах функционального поля дерева [40]. Однако, в сомкнутых насаждениях взаимное перекрывание функциональных полей деревьев и ярусов лесного биогеоценоза ограничивает выраженность этой дифференциации [41], что наблюдается в лиственном лесу. Исследования показывают, что виды деревьев не всегда оказывают значительное влияние на запасы углерода в верхнем слое почвы, во многих случаях такого влияния не прослеживается [32, 42, 43].

Сопоставляя два типа леса, можно отметить, что дубняк осоко-снытьевый характеризуется более высоким содержанием и запасами углерода в серогумусовых почвах, по сравнению с сосняком травяным с дубом. Это в определенной мере отражает различия в гранулометрическом составе почв. Кроме того, специфический состав лиственной подстилки способствует быстрому разложению опада в дубраве. Согласно эмпирическим исследованиям, разложение лиственной подстилки происходит быстрее, чем хвойного опада и мха [44–46], что обеспечивает интенсивное поступление углерода в почву. В хвойном лесу мох и травяной покров оказывают менее выраженное влияние на углеродные пулы из-за низкой интенсивности процессов гумусообразования и ограниченного поступления органики в минеральные горизонты почв.

### Заключение

Проведённое исследование позволило установить, что распределение запасов органического углерода в верхнем минеральном слое лесных почв лесостепной зоны Воронежской области во многом

определяется совокупным влиянием доминирующих древесных пород и других компонентов фитоценозов, однако статистически значимых различий между выделенными парцеллами выявлено не было ( $p > 0,05$ ). Наибольшее содержание (до 2,8–3,0 %) и максимальные запасы углерода (до 25 т С/га) обнаружены в условиях дубравы с участием клёна остролистного и липы мелколистной. В сосновом бору с небольшой долей дуба черешчатого содержание углерода, как правило, не превышало 2,0 %. Анализ распределения углерода по тессерам показал незначительное варьирование между приствольной, подкороновой и межкороновой зонами, указывая на отсутствие выраженной дифференциации микрозон внутри одного фитогенного поля.

Полученные результаты подтверждают, что участие лиственных пород, характеризующихся высокой продуктивностью и обильным листовым опадом, способствует увеличению пула углерода в лесных почвах, однако структурная мозаичность фитоценоза не формирует устойчивых закономерностей в пространственном распределении органического углерода. Это свидетельствует о комплексном характере взаимодействия биотических и абиотических факторов в лесных экосистемах лесостепной зоны и подчёркивает необходимость дальнейших исследований, направленных на детальное изучение влияния микроклиматических условий, видового состава и сукцессионных процессов на формирование запасов углерода в различных ярусах лесной экосистемы. Применение пространственного анализа, включающего учёт микрозональной структуры и факторов среды, открывает перспективы для получения более достоверной оценки углеродного баланса и его прогнозирования в условиях изменяющегося климата.

### Список литературы

1. IPCC. Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee, J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. – 2023. – pp. 35–115. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
2. Stavi I., Lal R. Agroforestry and biochar to offset climate change: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2013; 33(1): 81–96. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0081-1>
3. Lal R. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2008; 363(1492): 815–830. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>

4. Calvo De Anta R., Luís E., Febrero-Bande M., Galiñanes J., Macías F., Ortíz R., Casás F. Soil organic carbon in peninsular Spain: Influence of environmental factors and spatial distribution. *Geoderma*. 2020; 370: 114365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114365>
5. Дылис Н.В. Структура лесного биогеоценоза: Комаровские чтения, XXI. – Москва: Наука, 1969. – 55 с.
6. Уранов А.А. Фитогенное поле. Проблемы современной ботаники. Т. 1. – М.–Л.: Наука, 1965. – С. 251–254.
7. Zaharescu D.G., Burghilea C.I., Dontsova K., Reinhard C.T., Chorover J., Lybrand R. Biological Weathering in the Terrestrial System: An Evolutionary Perspective. In: *Geophysical Monograph Series / K. Dontsova, Z. Balogh-Brunstad, G. Le Roux (eds.)*. – Wiley, 2020. – P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119413332.ch1>
8. Hooper D.U., Bignell D.E., Brown V.K., Brussard L., Mark Dangerfield J., Wall D.H., Wardle D.A., Coleman D.C., Giller K.E., Lavelle P., Van Der Putten W.H., De Ruiter P.C., Rusek J., Silver W.L., Tiedje J.M., Wolters V. Interactions between Aboveground and Belowground Biodiversity in Terrestrial Ecosystems: Patterns, Mechanisms, and Feedbacks. *BioScience*. 2000; 50(12): 1049. DOI: [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[1049:IBAABB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[1049:IBAABB]2.0.CO;2)
9. Vanbergen A.J., Watt A.D., Mitchell R., Truscott A.-M., Palmer S.C.F., Ivits E., Eggleton P., Jones T.H., Sousa J.P. Scale-specific correlations between habitat heterogeneity and soil fauna diversity along a landscape structure gradient. *Oecologia*. 2007; 153(3): 713–725. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0766-3>
10. Карпачевский Л.О., Ашинов Ю.Н., Березин Л.В. Курс лесного почвоведения. – Майкоп: Аякс, 2009. – 345 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23114990>
11. Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г. Плодородие лесных почв как основа взаимосвязи почва-растительность. *Лесоведение*. – 2010. – № 5. – С. 45–56. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15201407>
12. Орлова М.А., Лукина Н.В., Кульпина Т.С., Камаев И.О., Смирнов В.Э., Кравченко Т.В. Мозаичность лесных биогеоценозов и продуктивность почв. *Лесоведение*. – 2011. – № 6. – С. 39–48. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17097643>
13. Арчегова И.Б., Кузнецова Е.Г. Влияние древесных растений на химический состав атмосферных осадков в процессе восстановления среднетаежных лесов. *Лесоведение*. – 2011. – № 3. – С. 34–43. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16367346>
14. Карпачевский Л.О. Лес и лесные почвы. – Москва: Лесная промышленность, 1981. – 264 с.
15. Luysaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B.E., Ciais P., Grace J. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*. 2008; 455(7210): 213–215. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature07276>
16. Angst G., Messinger J., Greiner M., Häusler W., Hertel D., Kirfel K., Kögel-Knabner I., Leuschner C., Rethemeyer J., Mueller C.W. Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds. *Soil Biology and Biochemistry*. 2018; 122: 19–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.026>
17. Poorter L., Craven D., Jakovac C.C., Van Der Sande M.T., Amissah L., Hérault B., et al. Multidimensional tropical forest recovery. *Science*. 2021; 374(6573): 1370–1376. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abh3629>
18. Heinrich V.H.A., Vancutsem C., Dalagnol R., Rosan T.M., Fawcett D., Silva-Junior C.H.L., Cassol H.L.G., Achard F., Jucker T., Silva C.A., House J., Sitch S., Hales T.C., Aragão L.E.O.C. The carbon sink of secondary and degraded humid tropical forests. *Nature*. 2023; 615(7952): 436–442. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05679-w>
19. Cao J., Wang X., Tian Y., Wen Z., Zha T. Pattern of carbon allocation across three different stages of stand development of a Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forest. *Ecological Research*. 2012; 27(5): 883–892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11284-012-0965-1>

20. Li S., Su J., Liu W., Lang X., Huang X., Jia C., Zhang Z., Tong Q. Changes in Biomass Carbon and Soil Organic Carbon Stocks following the Conversion from a Secondary Coniferous Forest to a Pine Plantation. *PLOS ONE*. 2015; 10(9): e0135946. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135946>
21. Sariyildiz T., Savaci G., Kravkaz I. Effects of tree species, stand age and land-use change on soil carbon and nitrogen stock rates in northwestern Turkey. *iForest - Biogeosciences and Forestry*. 2016; 9(1): 165–170. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor1567-008>
22. Balesdent J., Chenu C., Balabane M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*. 2000; 53(3–4): 215–230. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5)
23. Подвезенная М.А., Рыжова И.М. Зависимость вариабельности запасов углерода в почве от пространственной структуры растительного покрова лесных биогеоценозов. *Вестник Московского Университета. Серия 17: Почвоведение*. – 2010. – № 4. – С. 3–9. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16903495>
24. Mayer S., Wiesmeier M., Sakamoto E., Hübner R., Cardinael R., Kühnel A., Kögel-Knabner I. Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2022; 323: 107689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107689>
25. Osei R., Del Río M., Ruiz-Peinado R., Titeux H., Bielak K., Bravo F., Collet C., Cools C., Cornelis J.-T., Drössler L., Heym M., Korboulewsky N., Löf M., Muys B., Najib Y., Nothdurft A., Pretzsch H., Skrzyszewski J., Ponette Q. The distribution of carbon stocks between tree woody biomass and soil differs between Scots pine and broadleaved species (beech, oak) in European forests. *European Journal of Forest Research*. 2022; 141(3): 467–480. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01453-9>
26. Getino-Álvarez M., San-Martin R., Pretzsch H., Pach M., Bravo F., Turrión M.-B. Assessing soil C stock and C to N ratio of soil organic matter under mixed pine-beech forests at different scales. *European Journal of Forest Research*. 2023; 142(5): 1081–1098. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01578-5>
27. Dawud S.M., Raulund-Rasmussen K., Domisch T., Finér L., Jaroszewicz B., Vesterdal L. Is Tree Species Diversity or Species Identity the More Important Driver of Soil Carbon Stocks, C/N Ratio, and pH? *Ecosystems*. 2016; 19(4): 645–660. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-016-9958-1>
28. López-Marcos D., Martínez-Ruiz C., Turrión M.-B., Jonard M., Titeux H., Ponette Q., Bravo F. Soil carbon stocks and exchangeable cations in monospecific and mixed pine forests. *European Journal of Forest Research*. 2018; 137(6): 831–847. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1143-y>
29. Shi Y., Baumann F., Ma Y., Song C., Kühn P., Scholten T., He J.-S. Organic and inorganic carbon in the topsoil of the Mongolian and Tibetan grasslands: pattern, control and implications. *Biogeosciences*. 2012; 9(6): 2287–2299. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-9-2287-2012>
30. Simons C.H., Williams R.A. Influence of Oak and Maple Species on Soil Carbon: A Case Study. *Agricultural Research and Technology*. 2024; 28(4): 556419
31. Vesterdal L., Clarke N., Sigurdsson B.D., Gundersen P. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *Forest Ecology and Management*. 2013; 309: 4–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.017>
32. Boča A., Van Miegroet H., Gruselle M.-C. Forest Overstory Effect on Soil Organic Carbon Storage: A Meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*. 2014; 78(S1). DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.08.0332nafsc>
33. Peng Y., Schmidt I.K., Zheng H., Heděnc P., Bachega L.R., Yue K., Wu F., Vesterdal L. Tree species effects on topsoil carbon stock and concentration are mediated by tree species type, mycorrhizal association, and N-fixing ability at the global scale. *Forest Ecology and Management*. 2020; 478: 118510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118510>
34. Fleck S., Eickenscheidt N., Ahrends B., Evers J., Grüneberg E., Ziche D., Höhle J., Schmitz A., Weis W., Schmidt-Walter P., Andreae H., Wellbrock N. Nitrogen Status and Dynamics in German Forest Soils. In: *Status and Dynamics of Forests in Germany: Ecological Studies / N*. Wellbrock, A. Bolte (eds.). – Cham: Springer International Publishing, 2019. – Vol. 237. – P. 123–166. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_5)

35. Rodeghiero M., Vesterdal L., Marcolla B., Vescovo L., Aertsen W., Martinez C., Di Cosmo L., Gasparini P., Gianelle D. Soil nitrogen explanatory factors across a range of forest ecosystems and climatic conditions in Italy. *Forest Ecology and Management*. 2018; 408: 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.039>
36. Steffens C., Beer C., Schelfhout S., De Schrijver A., Pfeiffer E., Vesterdal L. Do tree species affect decadal changes in soil organic carbon and total nitrogen stocks in Danish common garden experiments? *European Journal of Soil Science*. 2022; 73(1): e13206. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13206>
37. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1977. – 312 с.
38. Харченко Н.Н., Мельников Е.Е., Миронов Д.С. К вопросу об особенностях сукцессионных процессов в порослевых дубравах Центрального Черноземья. Сборник научных статей «Леса, лесной сектор и экология Республики Татарстан». – Казань: Школа, 2007. – Т. 3. – С. 374–376. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22669496>
39. Pedrotti E., Rydin H., Ingmar T., Hytteborn H., Turunen P., Granath G. Fine-scale dynamics and community stability in boreal peatlands: revisiting a fen and a bog in Sweden after 50 years. *Ecosphere*. 2014; 5(10): 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1890/ES14-00202.1>
40. Ипатов В.С., Журавлева Е.Н., Лебедева В.Х., Тиходеева М.Ю. Фитогенное поле *Picea abies*, *P. obovate* (Pinaceae). *Ботанический журнал*. – 2009. – Т. 94, № 4. – С. 558–568. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17009165>
41. Крышень А.М. Фитогенное поле: теория и проявление в природе. *Известия АН. Серия биологическая*. – 2000. – № 4. – С. 437–443. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23090127>
42. Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*. 2020; 466: 118127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
43. Vesterdal L., Clarke N., Sigurdsson B.D., Gundersen P. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *Forest Ecology and Management*. 2013; 309: 4–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.017>
44. Dorrepaal E., Cornelissen J.H.C., Aerts R., Wallén B., Van Logtestijn R.S.P. Are growth forms consistent predictors of leaf litter quality and decomposability across peatlands along a latitudinal gradient? *Journal of Ecology*. 2005; 93(4): 817–828. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2005.01024.x>
45. Lang S.I., Cornelissen J.H.C., Klahn T., Van Logtestijn R.S.P., Broekman R., Schweikert W., Aerts R. An experimental comparison of chemical traits and litter decomposition rates in a diverse range of subarctic bryophyte, lichen and vascular plant species. *Journal of Ecology*. 2009; 97(5): 886–900. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01538.x>
46. Straková P., Niemi R.M., Freeman C., Peltoniemi K., Toberman H., Heiskanen I., Fritze H., Laiho R. Litter type affects the activity of aerobic decomposers in a boreal peatland more than site nutrient and water table regimes. *Biogeosciences*. 2011; 8(9): 2741–2755. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-8-2741-2011>

### References

1. IPCC. Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee, J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 2023; pp. 35–115. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
2. Stavi I., Lal R. *Agroforestry and biochar to offset climate change: a review*. *Agronomy for Sustainable Development*. 2013; 33(1): 81–96. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0081-1>
3. Lal R. *Carbon sequestration*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2008; 363(1492): 815–830. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>

4. Calvo De Anta R., Luis E., Febrero-Bande M., Galiñanes J., Macías F., Ortíz R., Casás F. *Soil organic carbon in peninsular Spain: Influence of environmental factors and spatial distribution*. *Geoderma*. 2020;370:114365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114365>
5. Dylis N. V. *Struktura lesnogo biogeotsenoza: Komarovskie chteniya, XXI* [Structure of the forest biogeocoenosis: Komarov Readings, XXI]. Moscow: Nauka; 1969. 55 p. (In Russ.)
6. Uranov A. A. *Fitogennoe pole* [Phytogenic field]. In: *Problemy sovremennoy botaniki*. Vol. 1. Moscow–Leningrad: Nauka; 1965. p. 251–254. (In Russ.)
7. Zaharescu D. G., Burghelea C. I., Dontsova K., Reinhard C. T., Chorover J., Lybrand R. *Biological Weathering in the Terrestrial System: An Evolutionary Perspective*. In: Dontsova K., Balogh-Brunstad Z., Le Roux G. (eds.). *Geophysical Monograph Series*. Wiley; 2020. p. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119413332.ch1>
8. Hooper D. U., Bignell D. E., Brown V. K., Brussard L., Mark Dangerfield J., Wall D. H., Wardle D. A., Coleman D. C., Giller K. E., Lavelle P., Van Der Putten W. H., De Ruiter P. C., Rusek J., Silver W. L., Tiedje J. M., Wolters V. *Interactions between Aboveground and Belowground Biodiversity in Terrestrial Ecosystems: Patterns, Mechanisms, and Feedbacks*. *BioScience*. 2000;50(12):1049. DOI: [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[1049:IBAABB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[1049:IBAABB]2.0.CO;2)
9. Vanbergen A. J., Watt A. D., Mitchell R., Truscott A.-M., Palmer S. C. F., Ivits E., Eggleton P., Jones T. H., Sousa J. P. *Scale-specific correlations between habitat heterogeneity and soil fauna diversity along a landscape structure gradient*. *Oecologia*. 2007;153(3):713–725. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0766-3>
10. Karpachevskiy L. O., Ashinov Yu. N., Berezin L. V. *Kurs lesnogo pochvovedeniya* [Course in forest soil science]. Maykop: Ayaks; 2009. 345 p. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23114990>
11. Lukina N. V., Orlova M. A., Isaeva L. G. *Plodorodie lesnykh pochv kak osnova vzaimosvyazi pochva-rastitel'nost'* [Fertility of forest soils as a basis for the soil–vegetation relationship]. *Lesovedenie = Russian Forestry Sciences*. 2010;(5):45–56. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15201407>
12. Orlova M. A., Lukina N. V., Kulpina T. S., Kamaev I. O., Smirnov V. E., Kravchenko T. V. *Mozaichnost' lesnykh biogeotsenzov i produktivnost' pochv* [Mosaic nature of forest biogeocoenoses and soil productivity]. *Lesovedenie = Russian Forestry Sciences*. 2011;(6):39–48. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17097643>
13. Arhegova I. B., Kuznetsova E. G. *Vliyaniye drevesnykh rasteniy na khimicheskiy sostav atmosferynykh osadkov v protsesse vosstanovleniya srednetaezhnykh lesov* [Influence of woody plants on the chemical composition of atmospheric precipitation during the restoration of middle-taiga forests]. *Lesovedenie = Russian Forestry Sciences*. 2011;(3):34–43. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16367346>
14. Karpachevskiy L. O. *Les i lesnye pochvy* [Forest and forest soils]. Moscow: Lesnaya promyshlennost'; 1981. 264 p. (In Russ.)
15. Luyssaert S., Schulze E.-D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D., Law B. E., Ciais P., Grace J. *Old-growth forests as global carbon sinks*. *Nature*. 2008;455(7210):213–215. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature07276>
16. Angst G., Messinger J., Greiner M., Häusler W., Hertel D., Kirfel K., Kögel-Knabner I., Leuschner C., Rethemeyer J., Mueller C. W. *Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds*. *Soil Biology and Biochemistry*. 2018;122:19–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.026>
17. Poorter L., Craven D., Jakovac C. C., Van Der Sande M. T., Amissah L., Hérault B., et al. *Multidimensional tropical forest recovery*. *Science*. 2021;374(6573):1370–1376. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abh3629>
18. Heinrich V. H. A., Vancutsem C., Dalagnol R., Rosan T. M., Fawcett D., Silva-Junior C. H. L., Cassol H. L. G., Achard F., Jucker T., Silva C. A., House J., Sitch S., Hales T. C., Aragão L. E. O. C. *The carbon sink of secondary and degraded humid tropical forests*. *Nature*. 2023;615(7952):436–442. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05679-w>

19. Cao J., Wang X., Tian Y., Wen Z., Zha T. *Pattern of carbon allocation across three different stages of stand development of a Chinese pine (Pinus tabulaeformis) forest*. Ecological Research. 2012;27(5):883–892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11284-012-0965-1>
20. Li S., Su J., Liu W., Lang X., Huang X., Jia C., Zhang Z., Tong Q. *Changes in Biomass Carbon and Soil Organic Carbon Stocks following the Conversion from a Secondary Coniferous Forest to a Pine Plantation*. PLOS ONE. 2015;10(9):e0135946. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135946>
21. Sariyildiz T., Savaci G., Kravkaz I. *Effects of tree species, stand age and land-use change on soil carbon and nitrogen stock rates in northwestern Turkey*. iForest - Biogeosciences and Forestry. 2016;9(1):165–170. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer1567-008>
22. Balesdent J., Chenu C., Balabane M. *Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage*. Soil and Tillage Research. 2000;53(3–4):215–230. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5)
23. Podvezennaya M. A., Ryzhova I. M. *Zavisimost' variabel'nosti zapasov ugloroda v pochve ot prostanstvennoy struktury rastitel'nogo pokrova lesnykh biogeotsenozov* [Dependence of the variability of carbon stocks in soil on the spatial structure of the plant cover of forest biogeocoenoses]. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie = Moscow University Soil Science Bulletin. 2010;(4):3–9. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16903495>
24. Mayer S., Wiesmeier M., Sakamoto E., Hübner R., Cardinael R., Kühnel A., Kögel-Knabner I. *Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis*. Agriculture, Ecosystems & Environment. 2022;323:107689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107689>
25. Osei R., Del Río M., Ruiz-Peinado R., Titeux H., Bielak K., Bravo F., Collet C., Cools C., Cornelis J.-T., Drössler L., Heym M., Korboulewsky N., Löff M., Muys B., Najib Y., Nothdurft A., Pretzsch H., Skrzyszewski J., Ponette Q. *The distribution of carbon stocks between tree woody biomass and soil differs between Scots pine and broadleaved species (beech, oak) in European forests*. European Journal of Forest Research. 2022;141(3):467–480. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01453-9>
26. Getino-Álvarez M., San-Martin R., Pretzsch H., Pach M., Bravo F., Turrión M.-B. *Assessing soil C stock and C to N ratio of soil organic matter under mixed pine-beech forests at different scales*. European Journal of Forest Research. 2023;142(5):1081–1098. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01578-5>
27. Dawud S. M., Raulund-Rasmussen K., Domisch T., Finér L., Jaroszewicz B., Vesterdal L. *Is Tree Species Diversity or Species Identity the More Important Driver of Soil Carbon Stocks, C/N Ratio, and pH?* Ecosystems. 2016;19(4):645–660. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-016-9958-1>
28. López-Marcos D., Martínez-Ruiz C., Turrión M.-B., Jonard M., Titeux H., Ponette Q., Bravo F. *Soil carbon stocks and exchangeable cations in monospecific and mixed pine forests*. European Journal of Forest Research. 2018;137(6):831–847. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1143-y>
29. Shi Y., Baumann F., Ma Y., Song C., Kühn P., Scholten T., He J.-S. *Organic and inorganic carbon in the topsoil of the Mongolian and Tibetan grasslands: pattern, control and implications*. Biogeosciences. 2012;9(6):2287–2299. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-9-2287-2012>
30. Simons C. H., Williams R. A. *Influence of Oak and Maple Species on Soil Carbon: A Case Study*. Agricultural Research and Technology. 2024;28(4):556419
31. Vesterdal L., Clarke N., Sigurdsson B. D., Gundersen P. *Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests?* Forest Ecology and Management. 2013;309:4–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.017>
32. Boča A., Van Miegroet H., Gruselle M.-C. *Forest Overstory Effect on Soil Organic Carbon Storage: A Meta-analysis*. Soil Science Society of America Journal. 2014;78(S1). DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.08.0332nafsc>
33. Peng Y., Schmidt I. K., Zheng H., Heděnc P., Bachega L. R., Yue K., Wu F., Vesterdal L. *Tree species effects on topsoil carbon stock and concentration are mediated by tree species type, mycorrhizal association, and*

*N-fixing ability at the global scale*. Forest Ecology and Management. 2020;478:118510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118510>

34. Fleck S., Eickenscheidt N., Ahrends B., Evers J., Grüneberg E., Ziche D., Höhle J., Schmitz A., Weis W., Schmidt-Walter P., Andreae H., Wellbrock N. Nitrogen Status and Dynamics in German Forest Soils. In: Wellbrock N., Bolte A. (eds.). *Status and Dynamics of Forests in Germany: Ecological Studies*. Cham: Springer International Publishing; 2019. Vol. 237. p. 123–166. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_5)

35. Rodeghiero M., Vesterdal L., Marcolla B., Vescovo L., Aertsen W., Martinez C., Di Cosmo L., Gasparini P., Gianelle D. *Soil nitrogen explanatory factors across a range of forest ecosystems and climatic conditions in Italy*. Forest Ecology and Management. 2018;408:25–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.039>

36. Steffens C., Beer C., Schelfhout S., De Schrijver A., Pfeiffer E., Vesterdal L. *Do tree species affect decadal changes in soil organic carbon and total nitrogen stocks in Danish common garden experiments?* European Journal of Soil Science. 2022;73(1):e13206. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13206>

37. Karpachevskiy L.O. *Pestrota pochvennogo pokrova v lesnom biogeotsenoze* [Variegation of the soil cover in a forest biogeocoenosis]. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta; 1977. 312 p. (In Russ.)

38. Kharchenko N.N., Melnikov E.E., Mironov D.S. *K voprosu ob osobennostyakh sukstsiionnykh protsessov v poroslevykh dubravakh Tsentral'noy Chernozem'ya* [On the issue of the features of successional processes in coppice oak forests of the Central Chernozem region]. In: Sbornik nauchnykh statey «Lesa, lesnoy sektor i ekologiya Respubliki Tatarstan» [Collection of scientific articles “Forests, the forestry sector, and ecology of the Republic of Tatarstan”]. Kazan: Shkola; 2007. Vol. 3. p. 374–376. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22669496>

39. Pedrotti E., Rydin H., Ingmar T., Hyttborn H., Turunen P., Granath G. *Fine-scale dynamics and community stability in boreal peatlands: revisiting a fen and a bog in Sweden after 50 years*. Ecosphere. 2014;5(10):1–24. DOI: <https://doi.org/10.1890/ES14-00202.1>

40. Ipatov V. S., Zhuravleva E. N., Lebedeva V. Kh., Tikhodeeva M. Yu. *Fitogennoe pole Picea abies, P. obovate (Pinaceae)* [Phytogenic field of *Picea abies*, *P. obovata* (Pinaceae)]. Botanicheskiy zhurnal = Botanical Journal. 2009;94(4):558–568. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17009165>

41. Kryschen' A. M. *Fitogennoe pole: teoriya i proyavlenie v prirode* [Phytogenic field: theory and manifestation in nature]. Izvestiya AN. Seriya biologicheskaya = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Biological Series. 2000;(4):437–443. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23090127>

42. Mayer M., Prescott C. E., Abaker W. E. A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G. W. D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J. A., Vanguelova E. I., Vesterdal L. *Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis*. Forest Ecology and Management. 2020;466:118127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>

43. Vesterdal L., Clarke N., Sigurdsson B. D., Gundersen P. *Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests?* Forest Ecology and Management. 2013;309:4–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.01.017>

44. Dorrepaal E., Cornelissen J. H. C., Aerts R., Wallén B., Van Logtestijn R. S. P. *Are growth forms consistent predictors of leaf litter quality and decomposability across peatlands along a latitudinal gradient?* Journal of Ecology. 2005;93(4):817–828. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2005.01024.x>

45. Lang S. I., Cornelissen J. H. C., Klahn T., Van Logtestijn R. S. P., Broekman R., Schweikert W., Aerts R. *An experimental comparison of chemical traits and litter decomposition rates in a diverse range of subarctic bryophyte, lichen and vascular plant species*. Journal of Ecology. 2009;97(5):886–900. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01538.x>

46. Straková P., Niemi R. M., Freeman C., Peltoniemi K., Toberman H., Heiskanen I., Fritze H., Laiho R. *Litter type affects the activity of aerobic decomposers in a boreal peatland more than site nutrient and water table regimes*. Biogeosciences. 2011;8(9):2741–2755. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-8-2741-2011>

### Сведения об авторах

*Шешницан Татьяна Леонидовна* – аспирант, ассистент кафедры лесной генетики, биотехнологии и физиологии растений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-2288-4929>, e-mail: [tatianasheshnitsan@gmail.com](mailto:tatianasheshnitsan@gmail.com)

*Матвеев Сергей Михайлович* – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8532-1484>, e-mail: [lisovod@bk.ru](mailto:lisovod@bk.ru)

✉ *Шешницан Сергей Сергеевич* – кандидат биологических наук, руководитель лаборатории мониторинга и проектирования лесов инжинирингового центра НИИ Инновационных технологий и лесного комплекса, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8027-855X>, e-mail: [sheshnitsan@gmail.com](mailto:sheshnitsan@gmail.com).

### Information about the authors

*Tatiana L. Sheshnitsan* – post-graduate student, Assistant of Department of Forest genetics, Biotechnology and Plant Physiology, G.F. Morozov Voronezh State Forest Engineering University, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2288-4929>, e-mail: [tatianasheshnitsan@gmail.com](mailto:tatianasheshnitsan@gmail.com)

*Sergey M. Matveev* – Doct. Sci. (Biol.), Head of Department of Silviculture, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8532-1484>, e-mail: [lisovod@bk.ru](mailto:lisovod@bk.ru).

✉ *Sergey S. Sheshnitsan* – Cand. Sci. (Biol.), Head of the Forest Monitoring and Planning Laboratory, Engineering Centre of the Research Institute of Innovative Technologies and Forestry Complex, Associate Professor of the Department of Landscape Architecture and Soil Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8027-855X>, e-mail: [sheshnitsan@gmail.com](mailto:sheshnitsan@gmail.com)

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/4>

УДК 630.81



## Технология формирования текстуры древесины с помощью направленного изменения ее проницаемости

Евгения В. Акинина<sup>1</sup> ✉, [eugeniya.mitina@yandex.ru](mailto:eugeniya.mitina@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5723-8883>

Сергей Г. Елисеев<sup>1</sup>, [eliseevsg@sibsau.ru](mailto:eliseevsg@sibsau.ru) <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

Владимир Н. Ермолин<sup>1</sup>, [vnermolin@yandex.ru](mailto:vnermolin@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация

В данной работе решалась задача избирательного окрашивания древесины за счет управляемого изменения ее проницаемости. Путем избирательного окрашивания обеспечивается формирование искусственной текстуры древесины при пропитке, что позволяет повысить декоративные свойства древесины берёзы. Для этого применялась продувка отдельных участков древесины воздухом для удаления из них свободной влаги, выдержка в термостате при определенных условиях для формирования побурения и пропитка раствором красителя в автоклаве. В ходе исследований установлены оптимальные параметры выдержки древесины для равномерного протекания побурения: температура 30 °С, влажность воздуха 75 %. При побурении газопроницаемость древесины берёзы снизилась в 9 раз в сравнении с контролем. Побурение делает древесину непроницаемой для окрашивающего раствора. На участках, где проводилась продувка, побурение протекает без существенного снижения проницаемости. Продувка обеспечивает полное окрашивание подготовленных участков. Это открывает новые возможности по созданию природоподобных текстур и расширяет использование древесины берёзы для производства декоративных изделий и отделочных материалов. Предложенная технология является экономически доступной, так как может быть реализована на серийно выпускающемся оборудовании и не требует значительных изменений в организации деревообрабатывающих производств.

**Ключевые слова:** *древесина, берёза, проницаемость, побурение, текстура, глубокое окрашивание*

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом научной лаборатории «Биорефайнинг лесных ресурсов» проекта «Исследование закономерностей процессов биодеструкции древесины погибших древостоев для разработки научно-обоснованных подходов получения новых функциональных материалов» (Номер темы FEFE-2024-0032).

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Акинина Е.В. Технология формирования текстуры древесины с помощью направленного изменения ее проницаемости / С.Г. Елисеев, В.Н. Ермолин // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 59-71. – Библиогр.: с. 68-71 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/4>

*Поступила* 24.12.2024. *Пересмотрена* 21.01.2025. *Принята* 07.02.2025. *Опубликована онлайн* 24.03.2025.

Article

## Wood texture formation technology by means of targeted change in its permeability

Evgeniya V. Akinina<sup>1</sup> ✉, eugeniya.mitina@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5723-8883>

Sergey G. Eliseev<sup>1</sup>, eliseevsg@sibsau.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

Vladimir N. Ermolin<sup>1</sup>, vnermolin@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prospekt im. gazeta Krasnoyarsk worker, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation*

### Abstract

In this work, the problem of selective coloring of wood was solved due to a controlled change in its penetrability. The formation of an artificial wood texture during impregnation is provided by the selective coloring which makes it possible to increase the decorative properties of birch wood. For this purpose, air purging of particular sections of wood was used to remove free moisture from them, exposure to a thermostat under certain conditions to form browning, and impregnation with a dye solution in an autoclave. During the study the optimal parameters of wood aging for uniform browning were established: temperature of 30 °C, 75 % of air humidity. During the browning process the gas permeability of birch wood decreased by 9 times compared to the control. Browning makes the wood impervious to the coloring solution. In the areas affected by purging, browning occurs without a significant decrease in penetrability. Purging ensures a complete coloring of the prepared areas. This opens up new possibilities for creating nature-like textures and expands the use of birch wood for the production of decorative products and finishing materials. The proposed technology is economically affordable, as it can be implemented on mass-produced equipment and does not require significant changes in the organization of woodworking industries.

**Keywords:** *wood, birch, permeability, browning, texture, deep staining*

**Funding:** The work was carried out within the frames of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia for the implementation by the team of the scientific laboratory «Biorefining of Forest Resources» of the project «Investigation of Regularities of the Processes of Perished Forest Stand Wood Biodegradation for the Development of Scientifically-Based Approaches to the Production of New Functional Materials» (subject number: FEFE-2024-0032).

**Acknowledgments:** authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declares no conflict of interest.

**For citation:** Akinina E.V., Eliseev S.G., Ermolin V.N. (2024). The technology of forming the texture of wood by means of a directional change in its permeability. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 59-71 (in Russian). –DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/4>.

*Received* 24.12.2024. *Revised* 21.01.2025. *Accepted* 07.03.2025. *Published online* 24.03.2025.

### Введение

Древесина является возобновляемым природным материалом, широко используемым в различ-

ных отраслях промышленности во всем мире. Благодаря своим уникальным свойствам, древесина востребована в домостроении, производстве мебели и предметов интерьера. Помимо показателей удельной прочности, при использовании натуральной

древесины большое внимание уделяется ее внешнему виду, формируемому за счет особенностей цвета и текстуры [1,2]. Древесина ценных пород обладает выразительной текстурой и привлекательным цветом. Как правило, такая древесина пользуется большим спросом в производстве продукции, для которой имеют большое значение эстетические характеристики. При этом запасы такой древесины крайне ограничены, что делает ее мало доступной для массового производства. Одним из вариантов решения данной проблемы является повышение декоративных свойств древесины широко распространенных малоценных лиственных пород.

К таким породам относится древесина берёзы, которая используется в основном при изготовлении лащеного шпона и мебельного щита. Древесина берёзы является заболонной породой, обладает светлым, желтоватым цветом со слабо выраженной текстурой [3,4]. Основные водопроводящие элементы – сосуды, равномерно распределены по ширине годичного слоя, поэтому при сквозной пропитке окрашивающими составами краситель распределяется относительно равномерно, что мало способствует повышению декоративных свойств древесины [5-7].

В настоящее время существует множество способов улучшения декоративных свойств древесины. К ним относится поверхностное и глубокое крашение древесины, избирательное окрашивание отдельных анатомических элементов древесины, комбинированная обработка поверхности с целью подчеркивания естественной текстуры древесины, метод лазерной перфорации и способ нанесения печати на поверхность древесины для имитации текстуры ценных пород [8-14].

Методы поверхностной обработки высокоэффективны, однако не всегда позволяют сохранить естественный вид окрашенного материала и не могут быть подвергнуты дальнейшей механической обработке. Метод глубокого окрашивания позволяет равномерно распределить окрашивающие вещества на всю длину заготовки, но текстура ограничивается зонами годичного слоя. Кроме того, этот метод подходит только для хорошо пропитываемых заболонных пород древесины. Большинство спосо-

бов избирательного окрашивания древесины не получили практического распространения из-за сложности и трудоемкости процессов, а также ограниченных возможностей в части создаваемых текстур.

Известно, что во время хранения свежесрубленной древесины берёзы при положительных температурах формируется ненормальная окраска – побурение, которое проходит вдоль волокон древесины от торцов к центру сортимента. Побурение древесины берёзы является аналогичным раневой реакции процессом и считается пороком древесины. При этом процессе заболонь древесины берёзы приобретает ярко красновато-бурый и рыжевато-бурый цвет, который быстро бледнеет на воздухе. По литературным данным, появление в древесине берёзы побурения начинается летом при уменьшении влажности древесины ниже 79% и распространяется от торца к торцу со скоростью около 30 см в месяц. Первые признаки побурения древесины при благоприятных условиях появляются через 1-2 недели после рубки дерева.

Побурение берёзы исследовали такие ученые как Вакин А.Т., Федоров Н.И., Соловьев В.А. Их мнения о причинах побурения во многом схожи. Вакин А.Т. отмечает роль окислительных процессов при побурении древесины в результате насыщения ее кислородом. Федоров Н.И. и Соловьев В.А. рассматривают побурение как комплекс нескольких реакций. Они определяются внешними факторами, прежде всего температурой окружающей среды и влажностью древесины. Сначала закупориваются проводящие пути, что приводит к замедлению испарения влаги из древесины и преграждению доступа в нее воздуха – раневая реакция. Далее, по мере уменьшения влажности древесины происходит процесс отмирания живых клеток заболони и окисления их кислородом воздуха, за счет чего образуется бурая окраска. Далее в древесине поселяются грибы и бактерии, которые приводят к дальнейшему изменению ее цвета. С.Г. Елисеев и др. (2021) [15], А.Р. Acosta (2024) [16] отмечают, что в процессе побурения резко снижается проницаемость древесины для газов и жидкостей. Такая древесина становится почти непроницаемой. Причиной снижения проницаемости при побурении, по-видимому, является

накопление в полостях клеток фибриллярного материала [17-20].

В работе В.Н. Ермолина<sup>1</sup> побурение древесины было предложено формировать искусственную текстуру в древесине за счет направленного изменения ее проницаемости на отдельных участках. Формирование участков с различной проницаемостью предлагалось обеспечивать за счет удаления свободной воды из сосудов на участках древесины планируемых к пропитке красителем. Проникающий в древесину кислород приводит к быстрой гибели живых паренхимных клеток древесины, и она сохраняет на этих участках свою проницаемость.

Предыдущие исследования показали принципиальную возможность использования побурения древесины для изменения ее проницаемости. Цель представленной работы – изучить процесс побурения древесины берёзы и разработать на его основе технологию управляемого избирательного окрашивания.

### Материалы и методы

Работа является эмпирическим исследованием.

### Объект и предмет исследований

Объектом данного исследования выступает свежесрубленная древесина берёзы. Особенностью древесины данной породы является развитие побурения, по всему сечению материала приводящее к снижению ее проницаемости. С учётом указанных особенностей предметом исследований являлась разработка технологии управляемого изменения проницаемости древесины за счет побурения для формирования искусственной текстуры при пропитке красителем.

### Сбор данных

Чтобы создать непроницаемые участки древесины, было необходимо определить оптимальные режимные параметры для гарантированного и равномерного протекания побурения. Для этого были изготовлены образцы из свежесрубленной древе-

сины берёзы в виде неокоренных круглых сортиментов длиной 300 мм и диаметром  $11 \pm 1$  см. Далее образцы помещались в контролируемые условия выдержки внутри электрического суховоздушного термостата СТ 1/80 СПУ. Образцы выдерживались в течение 15 дней при температуре равной 20, 25 и 30 °С и влажности воздуха от 90 % до 60 % (изменялась по мере высыхания образцов). Для удаления избыточной влаги внутри термостата был приоткрыт шибер, а равномерность условий обеспечивалась принудительной циркуляцией воздуха.

После 5, 10 и 15 дней выдержки образцы распиливались вдоль волокон для фиксации протекания побурения. Распространение побурения фиксировалось визуально и измерялось с использованием штангенциркуля. После этого образцы распиливались поперек волокон на полудиски каждые 5 см. Полудиски помещались в сушильный шкаф для определения влажности древесины сушильно-весовым методом. Исходная влажность древесины определялась на контрольных образцах, выпиленных из того же дерева.

Для определения изменения проницаемости при развитии побурения заготавливалась свежесрубленная древесина берёзы в виде круглых сортиментов длиной 300 мм и диаметром  $11 \pm 1$  см. Они выдерживались в термостате в течение 15 дней при температуре 30 °С и влажности воздуха от 90 % до 60 %. После выдержки из чураков изготавливались образцы прямоугольной формы размерами  $30 \times 50 \times 150$  мм (последний вдоль волокон), для определения газопроницаемости древесины вдоль волокон (рис. 3). Перед определением проницаемости образцы высушивались до влажности 10-12 %.

Измерение газопроницаемости проводилось по стандартной методике, регламентированной ГОСТ 16483.34-77. Отличительной особенностью применяемой методики являлось использование нестандартной струбцины для фиксации образцов длинной прямоугольной формы.

<sup>1</sup> Патент № 2773657 С1 Российская Федерация, МПК В27К 3/08. Способ локального окрашивания древесины : № 2021121274 : заявл. 16.07.2021 :

опубл. 07.06.2022 / В. Н. Ермолин, С. Г. Елисеев, А. В. Намятов, Е. В. Митина. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48772290>

Образцы зажимались в стальной струбине с резиновыми прокладками. Боковые поверхности образцов (за исключением испытываемых) изолировались нанесением двух слоев краски ПФ-115. Испытания проводились при давлении 0,1 МПа, 0,2 МПа и 0,3 МПа. Газопроницаемость  $V$ , м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> вычислялась по формуле:

$$V = \frac{V_2 - V_1}{F \cdot t}, \quad (1)$$

где  $V_2$  – конечная отметка уровня воды, м<sup>3</sup>;  $V_1$  – начальная отметка уровня воды, м<sup>3</sup>;  $F$  – рабочая площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;  $t$  – время изменения уровня воды, с.

Критерием оценки проницаемости испытуемой древесины являлся коэффициент газопроницаемости  $K$ , м<sup>3</sup>/с·МПа:

$$K = \frac{V \cdot h}{P}, \quad (2)$$

где  $V$  – газопроницаемость, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;  $h$  – высота образца, м;  $P$  – манометрическое давление, Мпа.

Для отработки технологии избирательного окрашивания использовались образцы свежесрубленной древесины стандартных размеров. Перед закладкой в термостат на участках древесины предназначенных к пропитке красителем осуществляли продувку образцов воздухом при помощи воздушного иньектора (рис. 1) по заранее спроектированной схеме, представленной на рис. 2. На данном этапе исследований схема продувки спроектирована с учетом диаметра образца и последующего раскроя.

В торцовую поверхность образца внедрялся иньектор. Затем через иньектор под давлением 0,6 МПа в древесину подавался воздух. Ввиду небольшой длины образцов такое значение давления продувки позволило сократить времезатраты. Продувка древесины длилась 1-2 минуты.

После продувки образцы помещались в термостат и выдерживались в нем в течение 15 дней при температуре 30 °С и влажности воздуха 75 %. Принятые значения параметров термостатирования обеспечивали интенсивность процесса побурения (испарение влаги, насыщение клеток древесины кислородом). После выдержки образцы подвергались окорке и торцовке.

Затем образцы помещались в автоклав, где при давлении 0,4 МПа пропитывались раствором кислотного красителя Совелан М в течение 60 минут. Выбор красителя был обусловлен его низкой дисперсностью (для исключения фильтрации) и хорошими окрашивающими свойствами для древесины.

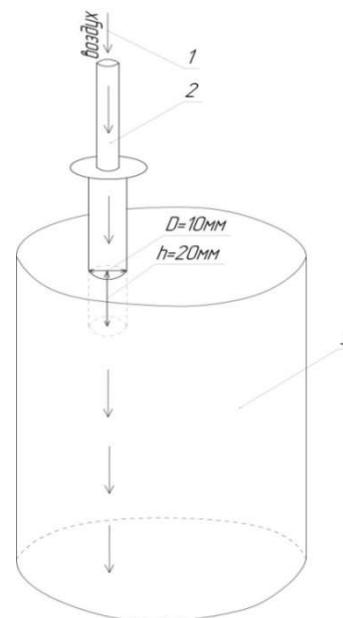


Рисунок 1. Продувка древесины воздухом: 1 – направление продувки; 2 – иньектор; 3 – образец древесины берёзы

Figure 1. Air purging of wood: 1 – purge direction; 2 – injector; 3 – birch wood sample

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

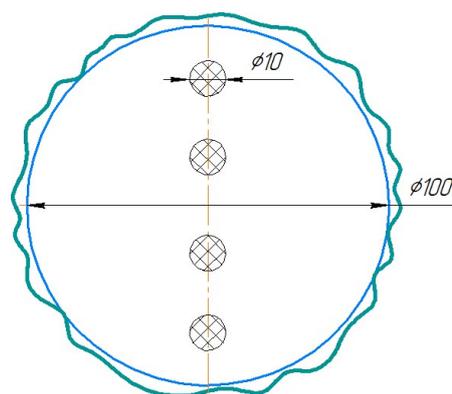


Рисунок 2. Схема продувки образцов воздухом  
Figure 2. The scheme of purging samples with air

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

После пропитки образцы распиливались по заранее определенной схеме раскроя для фиксации полученной текстуры.

## **Обработка данных газопроницаемости древесины**

Обработка полученных данных производилась с помощью инструментов Microsoft Excel и программы Statgraphics. Анализ статистических данных предусматривал расчёт следующих параметров: среднее значение, среднее квадратичное отклонение, доверительный интервал, точность опыта и коэффициент вариации.

### **Результаты**

Исследование протекания побурения древесины в зависимости от режимных параметров выдержки позволило выявить следующее. При распиливании образцов на 5 день выдержки развитие побурения в древесине выявлено не было. Что подтверждает литературные данные о проявлении побурения через 1-2 недели. Во всех вариантах эксперимента наблюдался лишь небольшой приторцовый участок бурого цвета длиной вдоль волокон менее 5 мм (рис.3).

На десятый 10 день выдержки в термостате при вскрытии образцов было зафиксировано, что фронты побурения в древесины практически сошлись, но в центральной части образцов наблюдались участки с отсутствием побурения (рис.4).

К 15 дню выдержки в термостате вне зависимости от режимных параметров побурение наблюдалось по всей длине образцов. Однако, при температуре 30 °С и влажности воздуха 75 % образцы древесины показывали более равномерное протекание процесса по всему сечению (рис.5).

Распределение влажности древесины с побурением по длине образца произошло следующим образом: после выдержки в термостате образцы древесины имели среднюю влажность 38,9 %, в то время как исходная начальная влажность свежесрубленной древесины составляла 65 % (рис. 6).

За 15 дней выдержки влажность образцов снизилась почти в 1,7 раза. При рассмотрении послойной влажности образцов предсказуемо наиболее низкая влажность древесины наблюдалась в притор-

цовой зоне 33-35,2 %, а наиболее высокая в центральной части образца 43,0-41,5 %. Перепад влажности центральной и приторцовой части образцов составил 18-20 %.

С учетом полученных результатов для дальнейшей отработки технологии избирательного окрашивания древесины осуществлялась выдержка древесины при условиях, обеспечивающих наиболее быстрое и равномерное протекание побурения по сечению материала: 15 дней при температуре 30 °С и влажности воздуха 75 %. Подготовленная при таких параметрах следующая партия образцов исследовалась на изменение параметров газопроницаемости древесины. Результаты исследований проницаемости древесины представлены в таблице 1. Из полученных результатов следует, что развитие побурения в древесине обеспечивает 9 кратное снижение ее газопроницаемости в сравнении с контролем (рис. 7).



Рисунок 3. Побурение древесины берёзы после выдержки в термостате в течении 5 дней

Figure 3. Brown streak of birch wood after exposure in thermostat for 5 days

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition



Рисунок 4. Побурение древесины берёзы после выдержки в термостате в течении 10 дней

Figure 4. Brown streak of birch wood after exposure in thermostat for 10 days

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition



Рисунок 5. Побурение древесины берёзы после выдержки в термостате в течении 15 дней  
Figure 5. Brown streak of birch wood after exposure in thermostat for 15 days

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition



Рисунок 6. Распределение влажности вдоль чурака  
Figure 6. Moisture distribution along the churak  
Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Таблица 1

Показатели коэффициента газопроницаемости древесины берёзы

Table 1

Indicators of the coefficient of gas permeability of birch wood

Группа образцов   Sample group	Количество испытаний образцов, шт   Number of sample tests, pc	Среднее значение, м <sup>3</sup> /с·МПа   The average value m <sup>3</sup> /s·MPa	Среднее квадратичное отклонение   The mean square deviation	Точность опыта, %   The accuracy of the experience, %	Коэффициент вариации, %   Coefficient of variation, %
Древесина с побурением   Brown streak wood	12	0,07 ±0,01	0,01	3,54	12,39
Здоровая древесина (контроль)   Healthy wood (control)	12	0,69 ±0,09	0,06	4,34	8,80

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

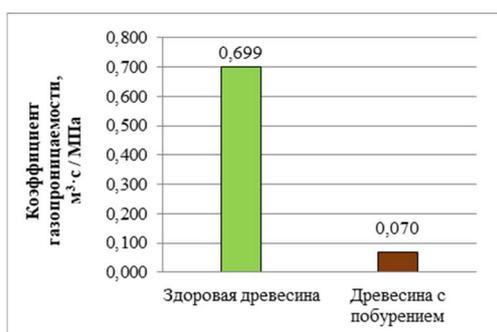


Рисунок 7. Среднее значение коэффициента газопроницаемости древесины берёзы

Figure 7. The average value of the gas permeability coefficient of birch wood

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Опытная пропитка раствором красителя также подтвердила низкую проницаемость древесины берёзы с побурением. На рис. 8 можно увидеть границы проникновения раствора красителя в древесину. Глубина продвижения пропиточного раствора составила не более 2 мм вдоль волокон. На отдельных участках пропиточный раствор продвинулся на

глубину не более 15 мм. Предположительно это связано с неравномерным протеканием раневой реакции в приторцовой зоне.

На следующем этапе исследования изучалась возможность управляемого изменения проницаемости на отдельных участках. Для этого в соответствии методикой образцы продувались на отдельных участках термостатировались и пропитывались красителем в автоклаве. Оценка характера проникновения пропиточного раствора в образцы фиксировалась после их распиловки на доски по схеме, представленной на рис. 9. Результат опытной пропитки представлен на рис. 10.



Рисунок 8. Образец древесины берёзы с побурением, пропитанный красителем

Figure 8. A sample of birch wood with browning, impregnated with a dye

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

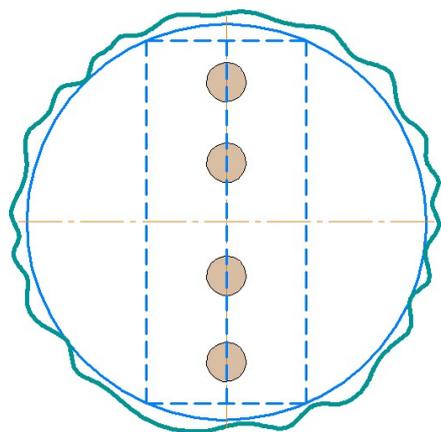


Рисунок 9. Раскрой образца после автоклавной пропитки

Figure 9. Cutting pattern of the sample after autoclave impregnation

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

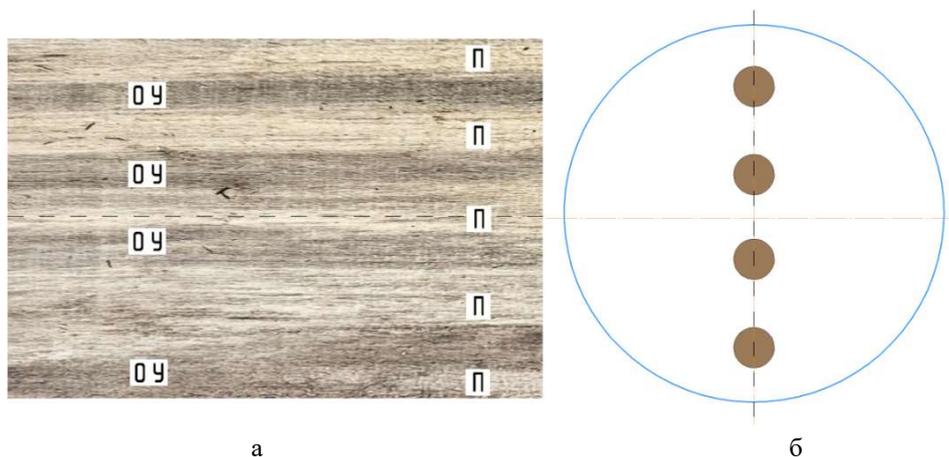


Рисунок 10. Сопоставление результата пропитки и схемы продувки проницаемых участков: а – полученная текстура древесины; б – схема продувки образца; ОУ– окрашенный участок; П – непроницаемый участок, древесина с побурением

Figure 10. Comparison of the impregnation result and the purge scheme of permeable areas: а – the resulting wood texture; б – the scheme of purging the sample; ОУ – painted area; П– impenetrable area, browned wood

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Изучение результатов пропитки позволило выявить следующее. В участках древесины с продувкой после автоклавной пропитки наблюдается более интенсивное окрашивание древесины красителем по всей длине образца. Окрашенные участки совпадают с участками, через которые продувался воздух. Вероятной причиной сохранения проницаемости на данных участках является быстрая гибель паренхимных клеток. Поэтому при развитии побурения на этом участке не вырабатываются вещества, закупоривающие проводящие пути, а, следовательно, сохраняется проницаемость древесины. Прилегающие к подготовленным к пропитке участкам зоны образца практически не имеют следов красителя. Это говорит об эффективности применения побурения для снижения проницаемости древесины.

### Обсуждение

Исходя из полученных данных, побурение значительно снижает проницаемость свежесрубленной древесины берёзы для жидкостей и газов.

В условиях эксперимента скорость продвижения побурения от торцов вдоль волокон составила около 15 см/мес. Данные результаты согласуются с литературными данными. При этом оказалось, что вариация температуры (от 20 до 30 °С) и влажности

воздуха (от 90 до 60 %) влияет не на скорость продвижения побурения, а на равномерность его протекания по длине и сечению. Вероятно, это объясняется более интенсивным снижением влажности древесины в отдельных вариантах, что приводит к быстрой гибели клеток без протекания раневой реакции и формирования побурения.

Продувка отдельных участков древесины берёзы позволяет управляемо и эффективно сохранять их проницаемость, несмотря на побурение. Что подтверждается опытными пропитками. При пропитке подготовленные продувкой участки древесины равномерно окрашиваются, а прилегающие зоны с обычным протеканием побурения остаются неокрашенными. В отличие от существующих способов формирования искусственной текстуры, разработанная технология обеспечивает высокую контрастность окрашивания, а использование элементов биотехнологии обеспечивает формирование природоподобной текстуры, что важно для изделий из натуральной древесины. Данная технология может быть успешно использована как один из методов художественной обработки древесины и создания эксклюзивных дизайнерских изделий.

## Заключение

Побурение приводит к 9 кратному снижению газопроницаемости древесины берёзы и делает ее малопроницаемой для жидкостей.

Оптимальными параметрами выдержки древесины для равномерного протекания побурения являются температура 30 °С при влажности воздуха 75 %.

Удаление воды из отдельных участков древесины сохраняет их проницаемость при побурении.

Впервые установлено, что продувка воздухом обеспечивает управление проницаемостью древесины исключительно за счет предотвращения раневой реакции, что открывает новые возможности для избирательного окрашивания древесины.

Полученные результаты могут найти применение в производстве изделий, к которым применяются повышенные эстетические требования таких как, отделочные материалы, предметы интерьера, мебель и др.

Разработанный способ может быть реализован на серийно выпускающемся оборудовании и не требует значительных изменений в организации деревообрабатывающих производств.

За счет изменения формы, размеров и размещения продуваемых участков древесины, а также различных вариантов цветовых решений может быть обеспечен широкий ассортимент выпускаемых текстур.

## Список литературы

1. Цой Ю.И., Блинов А.К. Декоративные свойства древесины. Тенденции развития науки и образования. – 2021. – № 71-2. – С. 35-38. DOI 10.18411/lj-03-2021-46.
2. Сохацкая Д.Г., Стужук Д.О. Древесина. Декоративные свойства и возможности применения. Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия : Материалы Международной научно-практической конференции. – 2022. – С. 103-106. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48152615>
3. Акинина Е.В., Елисеев С.Г., Ермолин В.Н. Влияние особенностей анатомического строения древесины берёзы на ее проницаемость для жидкостей. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – № 248. – С. 274-290. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.274-290
4. Ruffinatto F., Negro F., Crivellaro A. The macroscopic structure of wood. *Forests*, 2023; 14 (3): 644. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14030644>
5. Dubois H., Verkasalo E., Claessens H. Potential of birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for forestry and forest-based industry sector within the changing climatic and socio-economic context of Western Europe. *Forests*, 2020; 11 (3): 336. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11030336>
6. Снегирева С.Н., Платонов А.Д., Паринов Д.А., Медведев И.Н., Киселева А.В. Повышение качества пропитки древесины берёзы различными способами. Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9. – С. 126-133. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/14
7. Томина Е.В., Жужукин К.В., Дмитренко А.И., Нгуен Ань Тьен, Соловьева А.А., Дорошенко А.В., Корчагина А.Ю., Новикова Л.А. Исследование качества пропитки и структурных особенностей древесины берёзы методом микрорентгеновской компьютерной томографии. Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 4(56). – С. 172-186. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/12>
8. Елисеев С.Г., Ермолин В.Н., Дук Д.В. Применение лазерной перфорации для повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*). Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2023. – № 5 (395). – С. 151-163. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-151-163
9. Islam M.N. et al. Multifaceted Laser Applications for Wood—A Review from Properties Analysis to Advanced Products Manufacturing. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2023; 10 (2): 225-250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40516-023-00204-x>
10. Лукаш А.А. Формирование фактуры с ярко выраженной текстурой на поверхности древесины. Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2020. – Т. 58. – С. 183-187. URL : <https://elibrary.ru/item.asp?id=44172930>

11. Шетько С.В., Игнатович Л.В., Гайдук С.С., Чуйков А.С. Применение технологии печати для имитации текстуры ценных пород древесины при производстве мебели. Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2 (234). – С. 217-222. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43937092>
12. Соколов В.Л., Звонарева П.П. Использование техники браширования древесины при изготовлении мебели и предметов интерьера. Дизайн XXI века : VI Всероссийская заочная научно-практическая интернет-конференция с международным участием. – 2022. – С. 87-89. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49725279>
13. Цой Ю.И., Блинов А.К. Лессирующая отделка декоративных элементов из древесины цветными лакокрасочными материалами. Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 106-9. – С. 240-243. DOI: 10.18411/trnio-02-2024-537.
14. Тарбева Н.А., Рублева О.А. Анализ процессов декорирования и упрочнения заготовок из низколиквидной древесины для изготовления отделочных материалов. Общество. Наука. Инновации (НПК-2021) : сборник статей XXI Всероссийской научно-практической конференции. – 2021. – С. 654-660. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46158637>
15. Елисеев С.Г., Ермолин В.Н., Намятов А.В., Митина Е.В. Проницаемость древесины *Betula pubescens* и ее изменение. Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса : Материалы IV Международной научно-практической конференции. – 2021. – С. 31-34. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46510395>
16. Acosta A.P. et al. A review on wood permeability: influential factors and measurement technologies. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 2024; 21 (1): 175-191. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13196-024-00335-4>
17. Morris H. et al. Using the CODIT model to explain secondary metabolites of xylem in defence systems of temperate trees against decay fungi. Annals of Botany, 2020; 125 (5): 701-720. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcz138>
18. Romeiro D. et al. As anatomical features of the xylem could influence wound healing process in trees. Revista do Instituto Florestal, 2021; 33 (2): 119-138. DOI: <https://doi.org/10.24278/2178-5031.202133201>
19. Kashyap A. et al. Blocking intruders: inducible physico-chemical barriers against plant vascular wilt pathogens. Journal of Experimental Botany, 2021; 72 (2): 184-198. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa444>
20. Słupianek A., Dolzblasz A., Sokołowska K. Xylem parenchyma – role and relevance in wood functioning in trees. Plants, 2021; 10 (6): 1247. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10061247>

### References

1. TSoi I.U.I., Blinov A.K. *Dekorativnye svoistva drevesiny* [Decorative properties of wood]. Tendencies razvitiia nauki i obrazovaniia = Trends in the development of science and education, 2021; 71 (2): 35-38. (In Russ.). DOI 10.18411/lj-03-2021-46
2. Sokhatskaia D.G., Stuzhuk D.O. *Drevesina. Dekorativnye svoistva i vozmozhnosti primeneniia* [Wood. Decorative properties and application possibilities]. Regional'nye aspekty razvitiia nauki i obrazovaniia v oblasti arkhitektury, stroitel'stva, zemleustroistva i kadastr v nachale III tysiacheletia : Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Regional aspects of the development of science and education in the field of architecture, construction, land management and cadastre at the beginning of the III millennium : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 2022: 103-106. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48152615>
3. Akinina E.V., Eliseev S.G., Ermolin V.N. *Vliianie osobennostei anatomicheskogo stroeniia drevesiny berezy na ee pronitsaemost' dlia zhidkosti* [The influence of the anatomical structure of birch wood on its permeability to liquids]. Izvestiia Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii = Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy, 2024; 248: 274-290. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.274-290
4. Ruffinatto F., Negro F., Crivellaro A. *The macroscopic structure of wood*. Forests, 2023; 14 (3): 644. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14030644>
5. Dubois H., Verkasalo E., Claessens H. *Potential of birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for*

*forestry and forest-based industry sector within the changing climatic and socio-economic context of Western Europe*. Forests, 2020; 11 (3): 336. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11030336>

6. Snegireva S.N., Platonov A.D., Parinov D.A., Medvedev I.N., Kiseleva A.V. *Povyshenie kachestva propitki drevesiny berezy razlichnymi sposobami* [Improving the quality of impregnation of birch wood in various ways]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry engineering magazine*, 2019, 9: 126-133. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/14

7. Tomina E.V., Zhuzhukin K.V., Dmitrenkov A.I., Nguen An' T'en, Solov'eva A.A., Do-roshenok A.V., Korchagina A.IU., Novikova L.A. *Issledovanie kachestva propitki i strukturnykh osobennostei drevesiny berezy metodom mikrorentgenovskoi komp'yuternoi tomografii* [Investigation of the quality of impregnation and structural features of birch wood species by microrentgen computed tomography]. *Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry engineering magazine*, 2024; 14 (4(56)): 172-186. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/12>

8. Eliseev S.G., Ermolin V.N., Duk D.V. *Primenenie lazernoi perforatsii dlia povysheniia dekorativnykh svoystv drevesiny pikhty sibirskoi (Abies sibirica)* [The use of laser perforation to enhance the decorative properties of Siberian fir wood (*Abies sibirica*)]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal = News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2023; 5 (395): 151-163. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-151-163

9. Islam M.N. et al. *Multifaceted Laser Applications for Wood – A Review from Properties Analysis to Advanced Products Manufacturing*. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2023; 10 (2): 225-250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40516-023-00204-x>

10. Lukash A.A. *Formirovanie faktury s iarko vyrazhennoi teksturoi na poverkhnosti drevesiny* [Formation of a texture with a pronounced texture on the surface of wood]. *Aktual. problemy lesn. Kompleksa = Actual problems of the forest complex*, 2020; 58: 183-187. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44172930>

11. SHet'ko S.V., Ignatovich L.V., Gaiduk S.S., CHuikov A.S. *Primenenie tekhnologii pechati dlia imitatsii tekstury tsennykh porod drevesiny pri proizvodstve mebeli* [The use of printing technology to simulate the texture of valuable wood species in furniture production]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaistvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемykh resursov = Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources*, 2020; 2 (234): 217-222. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43937092>

12. Sokolov V.L., Zvonareva P.P. *Ispol'zovanie tekhniki brashirovaniia drevesiny pri izgotovlenii mebeli i predmetov inter'era* [The use of wood brushing techniques in the manufacture of furniture and interior items]. *Dizain XXI veka : VI Vserossiiskaia zaochnaia nauchno-prakticheskaiia internet-konferentsiia s mezhdunarodnym uchastiem = Design of the XXI century : VI All-Russian correspondence scientific and practical Internet conference with international participation*, 2022: 87-89. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=4972527>

13. TSoi IU.I., Blinov A.K. *Lessiruiushchaia otdelka dekorativnykh elementov iz drevesiny tsvetnymi lakokrassochnymi materialami* [Finishing decorative elements made of wood with colored paints and varnishes]. *Tendentsii razvitiia nauki i obrazovaniia = Trends in the development of science and education*, 2024; 106 (9): 240-243. (In Russ.). DOI: 10.18411/trnio-02-2024-537.

14. Tarbeeva N.A., Rubleva O.A. *Analiz protsessov dekorirovaniia i uprochneniia zagotovok iz nizkolikvidnoi drevesiny dlia izgotovleniia otdelochnykh materialov* [Analysis of the processes of decoration and hardening of blanks made of low-liquid wood for the manufacture of finishing materials]. *Obshchestvo. Nauka. Innovatsii (NPK-2021) : sbornik statei XXI Vserossiiskaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia = Societies. Sciences'. Innovations (NPC-2021) : collection of articles of the XXI All-Russian Scientific and Practical Conference*, 2021: 654-660. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46158637>

15. Eliseev S.G., Ermolin V.N., Namiatov A.V., Mitina E.V. *Pronitsaemost' drevesiny Betula pubescens i ee izmenenie* [The permeability of *Betula pubescens* wood and its change]. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiia lesopromyshlennogo kompleksa : Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Current problems and prospects for the development of the timber industry : Materials of the IV International Scientific and Practical Conference*, 2021: 31-34. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46510395>

16. Acosta A.P. et al. *A review on wood permeability: influential factors and measurement technologies*. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 2024; 21 (1): 175-191. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13196-024-00335-4>
17. Morris H. et al. *Using the CODIT model to explain secondary metabolites of xylem in defence systems of temperate trees against decay fungi*. Annals of Botany, 2020; 125 (5): 701-720. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcz138>
18. Romeiro D. et al. *As anatomical features of the xylem could influence wound healing process in trees*. Revista do Instituto Florestal, 2021; 33 (2): 119-138. DOI: <https://doi.org/10.24278/2178-5031.202133201>
19. Kashyap A. et al. *Blocking intruders: inducible physico-chemical barriers against plant vascular wilt pathogens*. Journal of Experimental Botany, 2021; 72 (2): 184-198. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa444>
20. Słupianek A., Dolzblasz A., Sokołowska K. *Xylem parenchyma – role and relevance in wood functioning in trees*. Plants, 2021; 10 (6): 1247. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10061247>

### Сведения об авторах

✉ Акинина Евгения Валериевна – ассистент кафедры технологии композиционных материалов и древесиноведения, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5723-8883>, e-mail: [eugeniya.mitina@yandex.ru](mailto:eugeniya.mitina@yandex.ru).

Елисеев Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, директор института лесных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7746-0158>, e-mail: [eliseevsg@sibsau.ru](mailto:eliseevsg@sibsau.ru).

Ермолин Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии композиционных материалов и древесиноведения, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», проспект им. газеты Красноярский рабочий, 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2113-4142>, e-mail: [vnermolin@yandex.ru](mailto:vnermolin@yandex.ru).

### Information about the authors

✉ *Evgeniya V. Akinina* – Assistant of the Department of Technology of Composite Materials and Wood Science, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prospekt im. gazeta Krasnoyarsk worker, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5723-8883>, e-mail: [eugeniya.mitina@yandex.ru](mailto:eugeniya.mitina@yandex.ru).

*Sergey G. Eliseev* – Candidate of Technical Sciences, Director of the Institute of Forest Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prospekt im. gazeta Krasnoyarsk worker, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7746-0158>, e-mail: [eliseevsg@sibsau.ru](mailto:eliseevsg@sibsau.ru).

*Vladimir N. Ermolin* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology of Composite Materials and Wood Science, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prospekt im. gazeta Krasnoyarsk worker, 31, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2113-4142>, e-mail: [vnermolin@yandex.ru](mailto:vnermolin@yandex.ru).

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/5>

УДК 630:547.992.3; 66.095.3; 665.939.56



## Образование лигнофенолоформальдегидных смол при среднем содержании щёлочи в реакционной смеси

Маргарита Г. Глазунова, [rita.mg.1212@yandex.ru](mailto:rita.mg.1212@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0778-6205>

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»,  
Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

Изучены состав и физико-химические свойства лигнофенолоформальдегидной смолы, синтезированной при содержании 15.9 % технических лигносульфонатов натрия относительно массы смолы по абсолютно сухим веществам. Цель работы – установить состав реакционной смеси на разных этапах синтеза лигнофенолоформальдегидной смолы. Были проведены физико-химические испытания для определения соответствия синтезированной смолы требованиям ГОСТ 20907–2016 «Смолы фенолоформальдегидные жидкие». Полученная лигнофенолоформальдегидная смола обладает крайне низким значением условной вязкости (15 с), повышенным содержанием свободного фенола (0.16 %) и свободного формальдегида (0.43 %). Методом спектроскопии ЯМР <sup>13</sup>С проведены исследование состава смолы на трёх этапах ее синтеза. Первая стадия синтеза характеризуется низкой реакционной способностью системы «фенол–формальдегид», обусловленной пониженным содержанием щелочного катализатора в реакционной смеси; наблюдаются сигналы свободного формальдегида и эфирных фрагментов. На второй стадии синтеза происходит углубление процесса поликонденсации с образованием олигомеров с высокой молекулярной массой, состоящих из трёх остатков фенола, соединённых одной метиленовой связью *пара-пара*’ и одной метиленовой связью *орто-пара*’. В реакционной смеси после второй стадии синтеза практически в 9 раз снижается количество свободных реакционных центров в *орто*-положении и на 9 % уменьшается доля метиленового углерода. На углеродных спектрах реакционной смеси после третьей стадии синтеза полностью отсутствуют сигналы свободных реакционных центров, в результате чего появляются сигналы свободного формальдегида. Полученные результаты исследования позволяют установить взаимодействие лигнина с фенолом во время выдержки реакционной смеси при температуре 96...98 °С, а также оценить влияние замещения доли фенола лигнином на химический состав смеси на разных этапах синтеза. Изготовленные с использованием синтезированной смолы древесностружечные плиты обладают хорошими физико-механическими показателями.

**Ключевые слова:** лигнофенолоформальдегидная смола, лигносульфонат натрия, физико-химический анализ смолы, спектроскопия ЯМР <sup>13</sup>С.

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** автор выражает благодарность научному руководителю доценту кафедры технологии древесных и целлюлозных композиционных материалов, кандидату технических наук Иванову Д.В. за консультации при подготовке материала, а также рецензентам за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Глазунова, М. Г. Образование лигнофенолоформальдегидных олигомеров при среднем содержании щёлочи в реакционной смеси / М. Г. Глазунова // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 72-90. – Библиогр.: с. 86-90. (31 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/5>.

**Поступила** 05.01.2025. **Пересмотрена** 18.02.2025. **Принята** 07.02.2025. **Опубликована онлайн** 24.03.2025.

## Formation of lignin-phenol-formaldehyde resins with an average alkali content in the reaction mixture

Margarita G. Glazunova, rita.mg.1212@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0778-6205>

*Saint-Petersburg State University of Forestry and Engineering named after S.M. Kirov, 5 Institutskiy Pereulok, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation*

### Abstract

In this study the composition and properties of lignin-phenol-formaldehyde resin have been studied. The lignin-phenol-formaldehyde resin was synthesized with a content of 15.9 % of technical sodium lignosulfonates relative to the resin weight by absolute dry. The aim of this research is to evaluate the composition of the reaction mixture of the synthesis of lignin-phenol-formaldehyde resin at different stages. Physico-chemical analysis was conducted to determine the compliance of the synthesized resin with the requirements of GOST 20907-2016 «Liquid phenol-formaldehyde resins. Specifications». The obtained lignin-phenol-formaldehyde resin has an extremely low relative viscosity (15 c) a high concentration of free phenol (0.16 %), and free formaldehyde (0.43 %). The composition of the resin was investigated using  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy at three synthesis stages. At the first stage of synthesis was observed the low reactivity of the “phenol-formaldehyde” system that explained by the low concentration of an alkaline catalyst in the reaction mixture. Additionally, signals of free formaldehyde and ether fragments were detected in the reaction mixture. During the second stage of synthesis, the process of polycondensation progressed further, resulting in the formation of high molecular weight oligomers. These oligomers comprise three phenol residues connected by one methylene para-para bond and one methylene ortho-para' bridge. Following the second stage of synthesis, the number of free reactive centers in the ortho position decreases by approximately 9 times in the reaction mixture, and the proportion of methylene carbon decreases by 9 %. The spectra of the reaction mixture after the third stage of synthesis exhibit a complete absence of signals from free reaction centers, resulting in signals of free formaldehyde. The obtained results of the study enable the establishment of the interaction between lignin and phenol during the exposure of the reaction mixture at a temperature of 96-98 °C, as well as the evaluation of the effect of substituting the phenol fraction with lignin on the chemical composition of the mixture at different stages of synthesis. Particleboards manufactured using the synthesized resin demonstrate favorable properties.

**Keywords:** *lignin-phenol-formaldehyde resin, sodium lignosulfonate, physico-chemical analysis of resin,  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy.*

**Funding:** this research receives no external funding.

**Acknowledgments:** the author expresses gratitude to the scientific supervisor, associate professor of the Department of Technology of wood and cellulose composite materials, and candidate of technical sciences D.V. Ivanov for consultations during the preparation of the material, as well as to the reviewers for their contribution to the expert evaluation of the article.

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

**For citation:** Glazunova M. G. (2025) Formation of lignin-phenol-formaldehyde oligomers at an average Alkali content in the reaction mixture. *Forestry Engineering Journal*, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 72-90 (in Russian). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/5>.

*Received* 05.01.2025. *Revised* 18.02.2025. *Accepted* 07.02.2025. *Published online* 24.03.2025.

## Введение

Фенолоформальдегидная смола (ФФС) вторая по распространённости формальдегидсодержащая смола, используемая в производстве древесных плит и фанеры [1]. Материалы, изготовленные с применением ФФС, обладают высокой водостойкостью, что является основным достоинством данных смол. Однако, существуют недостатки, к которым можно отнести токсичность исходных компонентов (фенола и формальдегида), а также высокую стоимость фенола, составляющую, по данным исследований [2] более 70 % расходов на стоимость сырья. В связи с этим, всё более актуальной становится задача по замене фенола на более экологичное и недорогое сырьё, которое не окажет негативное воздействие на свойства готовой смолы и материалов на её основе. Одним из наиболее очевидных альтернативных вариантов могут выступать технические препараты лигнина. Вопросам модифицирования ФФС лигнином посвящено достаточно большое количество исследований, обобщённых в результатах работ [3–7]

Основной проблемой использования лигнина при синтезе смол является низкая реакционная способность технических препаратов лигнина, обусловленная наличием метоксильных групп и пропановых цепочек соответственно у 3-го и 1-го атома углерода фенилпропановых единиц (соответствуют *орто*- и *пара*-положениям фенола). Модифицирование лигнина позволяет увеличить количество активных реакционных центров, тем самым повышая его реакционную способность. В своих исследованиях авторы [8–11] рассматривают наиболее часто используемые методы модифицирования: метилирование, фенолирование, деметилирование, восстановление, гидролиз и окисление. По мнению V. Hemmilä et al., (2017) [12] метилирование и фенолирование являются наиболее эффективными способами модифицирования лигнина, позволяющими достичь высокой реакционной способности. Несмотря на то, что с помощью модифицированного лигнина удалось заместить 40 % фенола на препараты лигнина без потери качества смолы и получаемых на её основе древесных материалов, процесс химического модифицирования увеличивает время

синтеза смолы и значительно повышает её стоимость так как требует специального оборудования, большого расхода реактивов и энергии, а также достаточно продолжительного времени обработки. Изложенные недостатки процесса модифицирования препаратов лигнина приводят к выводу о целесообразности исследований лигнофенолоформальдегидных смол, полученных с использованием технических препаратов лигнина без предварительной обработки.

В нашей стране основными источниками лигнина являются гидролизное и целлюлозно-бумажное производства. Технические препараты лигнина в зависимости от способа получения представляют собой сетчатый полимер (гидролизный лигнин) или смесь олигомеров (сульфатный лигнин или лигносульфонаты). Гидролизный лигнин является, практически не используемым в дальнейшей переработке, отходом гидролизной промышленности, его запасы составляют десятки миллионов тонн [13]. В процессе гидролиза происходят необратимые изменения структуры лигнина, которые значительно снижают его реакционную способность. Гидролизный лигнин не пригоден для синтеза лигнофенолоформальдегидной смолы без предварительного модифицирования, так как он практически не растворим ни в каких растворителях. Сульфатная варка является основным методом производства целлюлозы, при котором образуется большое количество побочного продукта – сульфатного лигнина. В своих работах авторы A. Eraghi Kazzaz et al., (2019) [14] и M. Ghorbani et al., (2016) [15] отмечают, что сульфатный лигнин обладает достаточно большой химической стабильностью и высокой реакционной способностью, обусловленной повышенным содержанием фенольных гидроксильных групп. Сульфатный лигнин растворим в водных растворах щелочей и многих органических растворителях. Лигнофенолоформальдегидные смолы, а также материалы на их основе, полученные с использованием сульфатного лигнина, обладают неплохими физико-химическими и физико-механическими характеристиками. При этом более 90 % сульфатного лигнина используется на целлюлозно-бумажных заводах в качестве топлива, что значительно ограничивает его применение в других областях промышленности.

В качестве одного из наиболее очевидных вариантов замены фенола могут выступать лигносульфонаты (ЛСТ). Лигносульфонаты являются ценным побочным продуктом сульфитной варки древесины, а также, согласно работам Кожевникова и др. (2023) [16] и T. Aro et al., (2017) [17] самым доступным и распространённым природным полимером фенольной структуры. Согласно данным исследования, проведённого в 2018 г. Discovery Research Group, и работам S. Gonçalves et al., (2021) [18] и T. Aro et al., (2017) [17] – более 90 % рынка лигнинов составляют ЛСТ. M. Ghorbani et al., (2017) [19] и Тептерева Г. (2019) [20] и в своих работах исследуют возможность применения ЛСТ для синтеза ЛФФС без предварительного модифицирования, что становится возможным благодаря высокой растворимости и сравнительно низкой молекулярной массе ЛСТ. Согласно данным, приведённым в работе M. Ghorbani et al., (2017) [19], среди различных лигносульфонатов (аммония, кальция, натрия и магния), наиболее предпочтительным для синтеза ЛФФС является лигносульфонат натрия, так как он практически не отличается от других ЛСТ по содержанию фенольных гидроксильных групп и имеет минимальную средневесовую массу, что снижает его влияние на вязкость синтезированных смол. В настоящий момент доступно замещение не более 30 % фенола на ЛСТ без снижения физико-механических характеристик продукции, изготавливаемой на основе лигнофенолоформальдегидных смол, что подтверждается результатами работ E. Melro et al., (2022) [21] и M. Thébault et al., (2020) [22]. При высокой степени замещения фенола препаратами лигнина довольно часто происходит отверждение смолы на заключительных этапах синтеза, также значительно снижается жизнеспособность синтезированных смол. Считается, что частичное замещение фенола лигнином снижает реакционную способность смолы из-за сравнительно низкой химической активности лигнина по сравнению с фенолом, что в свою очередь влияет на прочность и водостойкость продукции.

Состав ЛФФС претерпевает значительные преобразования при варьировании режимов синтеза и изменении рецептуры, что позволяет получить продукцию с требуемыми характеристиками. Химическая структура основных компонентов оказывает

значительное влияние на свойства синтезированных смол, в своей работе S. Yang et al., (2015) [5] использует метод спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР  $^{13}\text{C}$ ), позволяющий наиболее детально изучить структуру получаемых смол. Анализ смолы методом спектроскопии ЯМР позволяет определить влияние модифицирования на химический состав получаемых олигомеров, виды связей между структурными остатками и наличие побочных продуктов синтеза. Преимуществом метода ЯМР  $^{13}\text{C}$  является широкий диапазон химических сдвигов (от 0 до 220 м.д.), а также возможность идентифицировать различные структурные фрагменты, такие как метиленовые связи ( $-\text{CH}_2-$ ), диметиленэфирные связи ( $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-$ ), углероды ароматических колец, четвертичные атомы углерода и другие важные фрагменты. Метод ЯМР  $^{13}\text{C}$  позволяет получить подробную информацию об образовании ФФС, однако его использование в изучении ЛФФС сопряжено с рядом трудностей. Так, для получения качественных спектров требуется длительное время измерения образца и высокая концентрация лигнина в образце (по результатам исследования D. Zakusilo et al., (2023) [23] не менее 200 мг/мл), что значительно ограничивает возможности применения спектроскопии ЯМР при исследовании ЛФФС, однако этот метод является наиболее распространённым в исследовательских работах. Для получения дополнительной информации и уточнения результатов спектроскопии ЯМР  $^{13}\text{C}$  в работе M. Thébault et al., (2020) [22] используется также метод ИК-спектроскопии, а в исследовании M. Nishida et al., (2017) [24] также используется метод твёрдотельного ЯМР.

При синтезе лигнофенолоформальдегидной смолы, так же как и при синтезе ФФС, можно выделить два основных этапа. На первом этапе идёт образование фенолоспиртов и незначительного количества фенолоформальдегидных олигомеров, во время как на втором этапе происходит поликонденсация фенолоспиртов, при этом число фенолоформальдегидных олигомеров значительно увеличивается. В соответствии с результатами работ S. Gonçalves et al., (2021) [18], Y. Matsushita et al., (2015) [25] и X. Gong et al., (2022) [26] формальдегид может взаимодействовать с олигомерами лигнина в 4-х различных положениях: присоединение к 3-му или 5-

ому (является основным реакционным центром лигнина) положению фенилпропановых единиц в ароматическом кольце, а также к  $\alpha$ - или  $\beta$ -положению пропановой цепи. Yang, 2015 [8] в своей работе показывает, что в ЛФФС в первую очередь происходит образование фенолоспиртов, которые затем взаимодействуют с молекулами лигнина. По результатам работ S. Yang et al., 2015 [5] и M. Thébault et al., (2020) [22] основным типом связей в ЛФФС являются связи 5-пара'.

Изменение содержания щелочного катализатора в рецептуре смолы позволяет влиять на выход фенолоспиртов на первой стадии синтеза смолы, а, следовательно, изменять химическую активность системы «фенол–формальдегид». Увеличению содержания щелочи в реакционной смеси приводит к увеличению выхода фенолоспиртов на первой стадии синтеза и снижению скорости поликонденсации на второй стадии. Снижение содержания щелочи в реакционной смеси позволяет интенсифицировать процесс поликонденсации на второй стадии синтеза. Наибольший интерес при изучении клеящих фенолоформальдегидных смол представляют смолы со средним содержанием NaOH в реакционной смеси, они позволяют получить древесностружечные плиты и фанеру с более высокими физико-механическими характеристиками [27].

Множество работ, опубликованных за последние годы, указывают на актуальность исследований по разработке лигнофенолоформальдегидных смол. На основании выполненного анализа научных и экспериментальных данных можно сделать вывод о необходимости более подробного изучения влияния степени замещения фенола препаратами лигнина на химическую структуры синтезированной смолы. Проведённые экспериментальные исследования позволят понять механизмы и химические аспекты взаимодействия формальдегида, лигнина и фенола на каждом этапе синтеза, что в свою очередь даст возможность предположить дальнейшие пути изменения рецептуры смолы и режимов синтеза для получения ЛФФС и древесных материалов на их основе с высокими эксплуатационными свойствами.

*Цель работы* – установить состав реакционной смеси на разных этапах синтеза лигнофенолоформальдегидной смолы.

## Материалы и методы

### *Объект и предмет исследований*

Объекты исследования – синтезированная лигнофенолоформальдегидная смола, полученная с замещением 30 % фенола на лигносульфонат натрия и пониженным содержанием гидроксида натрия в реакционной смеси. Уровень замещения 30 % фенола препаратами лигнина можно считать достаточным с экологической и экономической точки зрения, при этом сохраняется достаточно высокая химическая активность системы и сохраняются на приемлемом уровне физико-механические характеристики конечного продукта.

Предмет исследований – физико-химические свойства синтезированной ЛФФС и её химический состав.

### *Дизайн эксперимента*

В работе использовали фенол синтетический технической марки А (ГОСТ 23519–93); гидроксид натрия ч.д.а. (ГОСТ 4328–77) в виде водного раствора концентрацией 40 %; параформальдегид марки С (ТУ 6-09-141-03–89); технические лигносульфонаты натрия, полученные на одном из отечественных предприятий (табл. 1); дистиллированную воду.

Синтез ЛФФС проводили в трёхгорлой колбе объёмом 250 мл, снабженной механической мешалкой, термометром и обратным холодильником. Температуру реакционной смеси регулировали при помощи водяной бани. В колбу загружали фенол, дистиллированную воду, водный раствор NaOH и ЛСТ. Колбу подключали к механической мешалке, нагревали реакционную смесь до 96–98 °С и выдерживали 1 ч. Реакционную смесь охлаждали до 45–50 °С, загружали первую порцию параформа, нагревали смесь до 55–60 °С и выдерживали в течение 1 ч (первая стадия синтеза). Далее реакционную смесь нагревали до 96–98 °С и выдерживали в течение 15 мин (вторая стадия синтеза). По окончании выдержки смесь охлаждали до 80 °С, загружали вторую порцию параформа и выдерживали при температуре 80–85 °С в течение 10 мин (третья стадия синтеза). Готовую смолу охлаждали до 25–30 °С и сливали в приёмную ёмкость.

Содержание абс. сух. ЛСТ относительно абс. сух. смолы составило 15,9 %. Для оценки влияния ЛСТ на состав и качество синтезированной смолы,

изготавливали образец базовой смолы (Б) без использования лигнина.

Рецептура синтезированных смол была следующей, масс. ч.:

	Б	ЛФФС
фенол.....	100,0	100,0
ЛСТ.....	–	42,9
формальдегид.....	68,4	95,7
NaOH.....	21,7	31,0
дистиллированная вода.....	193,8	276,9

Таблица 1

Физико-химические свойства используемых лигносульфонатов

Table 1

Properties of the lignosulfonates

Наименование показателя   The appellation of the parameter	Значение показателя   The value of the parameter
Внешний вид   Appearance	Вязкая жидкость тёмно-коричневого цвета   Viscous liquid of dark brown color
Плотность, г/см <sup>3</sup>   Density, g/cm <sup>3</sup>	1,247
Массовая доля сухого остатка, %   Mass fraction of dry residue, %	47,2
Условная вязкость, с   Conditional viscosity, sec	25
Концентрация водородных ионов (pH)   Concentration of hydrogen ions (pH)	4,4
Массовая доля золы (по а.с.в.), %   Mass fraction of ash (by absolutely dry substances), %	19,1
Массовая доля редуцирующих веществ (по а.с.в.), %   Mass fraction of reducing substances (by absolutely dry substances), %	10,8

Источник: открытые данные производителя лигносульфонатов

Source: open data of the manufacturer of lignosulfonates

При анализе синтезированных смол определяли: массовую долю сухого остатка (ГОСТ 20907–2016); условную вязкость с использованием вискозиметра ВЗ-4 (ГОСТ 8420–2022); концентрацию водородных ионов (pH) с использованием прибора pH-410; содержание щелочи (ГОСТ 20907–2016) и содержание свободного формальдегида (ГОСТ 16704–2017, метод 1) с использованием прибора pH-410; содержание свободного фенола методом отгонки водяным паром (ГОСТ 20907–75, прил. 3).

Для исследования состава синтезированных смол на разных этапах синтеза проводили анализ ме-

тодом спектроскопии ЯМР <sup>13</sup>C. В качестве растворителя использовали дейтерированную воду (D<sub>2</sub>O). Для анализа использовали пробу реакционной смеси, отобранную после каждого этапа синтеза (всего 3 пробы на синтезированный образец). Смешивали 400 мкл анализируемой пробы с 50 мкл растворителя. Измерения проводили на спектрометре «Bruker» при рабочей частоте 1000 МГц (1024 измерений за 1 ч).

Строение отверждённых образцов изучали при помощи ИК-спектроскопии. Образец синтезированной смолы с массой 5 г помещали в стеклян-

ный бокс и подвергали термообработке, воспроизводя режим прессования древесностружечных плит (ДСтП), при температуре 160 °С на протяжении 7 мин в термостате. На следующем этапе полимер измельчали и отбирали порошок, прошедший через сито диаметром 0,5 мм и оставшийся на поддоне (фракцию 0,5/-). Спектры получали на спектрометре марки ФСМ-1201 со спектральным диапазоном 400–7800 см<sup>-1</sup> и со спектральным разрешением 1,0 см<sup>-1</sup>.

Изготавливали однослойные древесностружечные плит (ДСтП) размерами 200 × 200 × 10 мм и расчётной плотностью 680 кг/м<sup>3</sup>. Стружку, используемую для изготовления плит, получали из берёзовых карандашей на лабораторном дисковом стружечном станке ЛС 100/27. Стружка соответствовала следующим характеристикам: длина до 40 мм, ширина до 2 мм, толщина 0,15–0,45 мм и абсолютная влажность 3 %. Для обеспечения одинаковой влажности осмолённой стружки связующее разбавляли до концентрации 38 %. Расход синтезированных смол принимали равным 8 % от массы абсолютно сухой стружки. Осмоление проводили с использованием пневматического распылителя. Осуществляли горячее прессование на лабораторном прессе марки НРА-500 × 500 × 1 × 160 при температуре прессования 200 °С, давлении 2,8 МПа и продолжительности 0,7 мин/мм толщины готовой плиты.

В ходе испытаний ДСтП определяли следующие показатели: прочность при изгибе (ГОСТ

10632–2014), прочность при растяжении перпендикулярно пласти (ГОСТ 10636–2018), разбухание и водопоглощение в холодной воде за 24 ч (ГОСТ 10633–2018), содержание свободного формальдегида баночным методом [28]. Также проводили испытания разбухания и водопоглощения образцов в кипящей воде за 1 ч. Для этого образцы размером 50 × 35 мм помещали в стеклянный стакан объёмом 500 см<sup>3</sup> и фиксировали на требуемом уровне при помощи ограничителей из металлической сетки. Затем стакан устанавливали на электрическую плитку, заливали 400 см<sup>3</sup> кипящей дистиллированной воды и поддерживали кипение в течение 1 часа. После извлечения образцов определение показателей проводили в соответствии со стандартной методикой.

## Результаты

Результаты физико-химических испытаний синтезированной ЛФФС подтвердили значительное влияние ЛСТ на свойства образца (табл. 2). Отсутствие стандарта на ЛФФС приводит к необходимости оценки свойств смолы в соответствии с показателями ФФС. Так как большая часть ФФС используется для производства фанеры для сравнения были выбраны смолы СФЖ–3011, СФЖ–3013 и СФЖ–3014 (значения указаны в соответствии с ГОСТ 20907–2016 «Смолы фенолоформальдегидные жидкие. Технические условия»).

Таблица 2

Физико-химические свойства смол

Table 2

Properties of the investigated resins

Наименование показателя Naming of the indicator	Значение показателя   The value of the indicator				
	Б   В	ЛФФС   LPF resin	СФЖ–3011   SFJ–3011	СФЖ–3013   SFJ–3013	СФЖ–3014   SFJ–3014
Массовая доля сухого остатка, %   Mass fraction of solid resin, %	41,9	42,0	43–47	39–43	46–52
Условная вязкость, с   Conditional viscosity, s	14	15	120–400	40–130	17–130
Концентрация водородных ионов (рН)   Concentration of hydrogen ions (рН)	10,6	10,5	Не определяют   Not determine		

Содержание, %:   Content of, %:					
• щелочи   alkali	4,9	3,9	3,0–3,5	4,5–5,5	6,0–7,5
• свободного фенола   free phenol	0,29	0,16	≤ 2,50	≤ 0,18	≤ 0,10
• свободного формальдегида   free formaldehyde	0,05	0,43	≤ 1,00	≤ 0,18	≤ 0,10

Источник: собственные вычисления автора, ГОСТ 20907–2016 «Смолы фенолоформальдегидные жидкие. Технические условия»

Source: own calculations, GOST 20907-2016 «Liquid phenolformaldehyde resins. Specifications».

По результатам проведённых испытаний ЛСТ практически не влияют на сухой остаток и концентрацию ионов водорода, условная вязкость ЛФФС незначительно больше, чем у смолы Б. ЛФФС имеют более низкое, чем в смоле Б, содержание щелочи, что может быть обусловлено нейтрализацией гидроксида натрия ЛСТ. Косвенно на взаимодействие лигнина с формальдегидом указывает снижение содержания свободного фенола при увеличении содержания свободного формальдегида. Значительное увеличение доли свободного формальдегида по сравнению с базовой смолой обусловлено низкой химической активностью ЛСТ по сравнению с фенолом. Характерной особенностью синтезированной смолы является пониженное количество гидроксида натрия, вводимого в реакционную смесь, в результате чего содержание щелочи не соответствует значениям, предъявляемым к ФФС, используемым для изготовления древесных плит и фанеры, при этом содержание щелочи выше минимального допустимого уровня для рассматриваемых смол (3,0 % для СФЖ–3011). Синтезированная ЛФФС обладает достаточно низкой массовой долей сухого вещества, соответствующей значениям только ФФС марки СФЖ–3013. Содержание свободного формальдегида более чем в 2,4 раза превышает максимальное значение для ФФС марок СФЖ–3013 и СФЖ–3014, но является допустимым для марки СФЖ–3011. В смоле также присутствует достаточно большое количество свободного фенола, что указывает на отсутствие взаимодействия части молекул фенола с формальдегидом, при этом содержание свободного фенола является допустимым как для СФЖ–3011, так и для СФЖ–3013. По данным Кондратьева В.П. (2004) [29] увеличение количества свободного фенола в смолах положительно сказывается на адгезионной прочности клеевых соединений, а также при-

водит к росту густоты пространственной сетки и механических показателей отверждённой смолы. Единственным параметром, не соответствующим требованиям ГОСТ для рассматриваемых смол является низкая условная вязкость синтезированной ЛФФС, которая может обуславливаться недостаточной глубиной поликонденсации. Готовая ЛФФС однородна по своей структуре, сохраняет физико-химические свойства при хранении и имеет более тёмный цвет, чем стандартные ФФС. Большинство физико-химических свойств синтезированной ЛФФС соответствуют требованиям ГОСТ для ФФС, используемых для производства древесных плит и фанеры, тем не менее полного соответствия показателям одной конкретной марки смолы не наблюдается. Незначительные изменения режима синтеза (например, увеличение продолжительности выдержки реакционной смеси при температуре 96–98 °С) могут позволить повысить условную вязкость готовой смолы, а также увеличить полноту связывания фенола с формальдегидом, тем самым снизить содержание свободного фенола и формальдегида в готовой смоле.

Подробное изучение строения компонентов синтезированной ЛФФС проводили методом спектроскопии ЯМР <sup>13</sup>С. Полученные спектры не позволили обнаружить лигнин и его производные, о химическом взаимодействии ЛСТ с компонентами смолы на каждой из стадий синтеза можно судить косвенно по изменению доли ядер <sup>13</sup>С фенолоформальдегидных олигомеров (ФФ-олигомеров) и фенолоспиртов. Качественный анализ спектров (рис. 1) позволяет увидеть только наличие или отсутствие сигналов ядер <sup>13</sup>С, относящихся к определённым функциональным группам на разных стадиях синтеза смолы. При качественном анализе спектров ФФС и ЛФФС можно увидеть, что на спектрах

ЛФФС ярче выражены сигналы эфирных фрагментов (65–72 м. д.), а также уменьшаются и полностью пропадают на третьей стадии сигналы свободного *орто*-положения ароматического кольца (115–119 м. д.), присутствующие на всех спектрах ФФС. Спектры ФФС отличаются также наличием сигналов формиат-иона в области 170–172 м. д.

В процессе синтеза ЛФФС исчезает пик (уменьшается на второй стадии и полностью пропадает на третьей), характерный для свободного *орто*-

положения ароматического кольца. На второй и третьей стадиях появляются сигналы в области 33–36 м.д., характерные для метиленовой связи *орто-пара*'. Сигналы ядер углерода производных свободного формальдегида (81–83 м.д. и 85–87 м.д.) наблюдаются на первой и третьей стадиях; пики сигналов эфирных фрагментов фенолоспиртов и ФФ-олигомеров полностью исчезают после первой стадии синтеза.

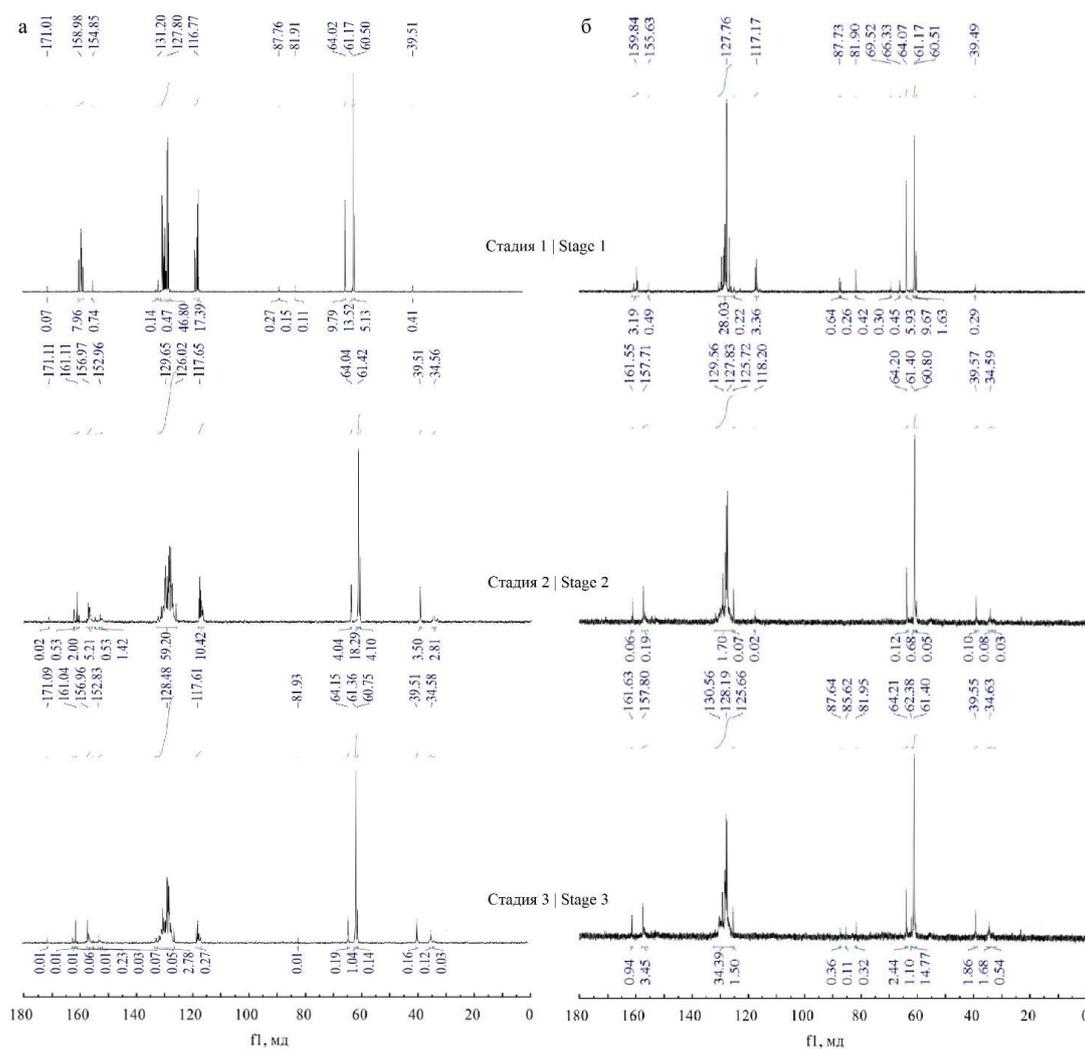


Рисунок 1. Спектры ЯМР  $^{13}\text{C}$  фенолоформальдегидной смолы (а) и лигнофенолоформальдегидной смолы (б),

снятые на трёх стадиях синтеза (1000 МГц, ДМСО)

Figure 1.  $^{13}\text{C}$  NMR spectra of PF resins (a) and LPF resins (b) after the three synthesis stage (1000 MHz, DMSO)

Источник: собственная композиция автора

Source: author composition

Результаты количественного анализа позволили более точно судить о химическом взаимодействии ЛСТ с компонентами ФФС (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика спектров ЯМР  
фенолоформальдегидной и лигнофенолоформальдегидной смолы

Table 3

<sup>13</sup>C NMR assignments and their quantitative analysis results  
of PF resins and LPF resins

Структура   Structure	Химический сдвиг, м.д   Chemical shift, m.f.	Обозначение смолы   Resin name					
		ФФС   PF resins			ЛФФС   LPF resins		
		Стадия синтеза   The synthesis stage					
		1	2	3	1	2	3
<b>Метиленовый углерод   Methylene carbon</b>	–	<b>28,54</b> <b>100</b>	<b>29,22</b> <b>100</b>	<b>32,50</b> <b>100</b>	<b>37,50</b> <b>100</b>	<b>34,24</b> <b>100</b>	<b>36,05</b> <b>100</b>
<b>Метиленовые связи   Methylene bonds</b>	–	<b>1,40</b>	<b>19,26</b>	<b>18,82</b>	<b>1,48</b>	<b>19,55</b>	<b>17,97</b>
<i>ortho</i> -CH <sub>2</sub> - <i>para</i> '	33,0–35,9	–	8,58	9,41	–	10,37	9,78
<i>ortho</i> -CH <sub>2</sub> - <i>para</i> '							
<i>para</i> -CH <sub>2</sub> - <i>para</i> '	39,0–41,0	1,40	10,68	9,41	1,48	9,18	8,19
<i>para</i> -CH <sub>2</sub> - <i>para</i> '							
<i>para-para</i> ' : <i>ortho-ortho</i> '	–	–	1 : 0,80	1,0 : 1,0	–	1 : 1,13	1 : 1,19
<b>Эфирные фрагменты   Etheral fragments</b>	–	–	–	–	<b>3,83</b>	–	–
Ф-CH <sub>2</sub> -O-CH <sub>2</sub> -Ф	69,0–72,0	–	–	–	1,53	–	–
Ф-CH <sub>2</sub> -O-CH <sub>2</sub> OH	65,0–67,0	–	–	–	2,30	–	–
<b>Метилольные группы   Methyl groups</b>	–	<b>96,80</b>	<b>80,74</b>	<b>80,59</b>	<b>87,95</b>	<b>80,45</b>	<b>80,63</b>
<i>ortho</i> -CH <sub>2</sub> OH   <i>ortho</i> -CH <sub>2</sub> OH	61,4–61,5	17,46	12,55	8,24	8,32	4,89	–
<i>diortho</i> -CH <sub>2</sub> OH   <i>diortho</i> -CH <sub>2</sub> OH	61,6–62,3	46,02	55,83	61,18	49,36	63,92	69,88
<i>para</i> -CH <sub>2</sub> OH   <i>para</i> -CH <sub>2</sub> OH	63,0–66,0	33,32	12,36	11,18	30,27	11,64	10,74
<b>Свободный формальдегид   Free formaldehyde</b>	–	<b>1,80</b>	–	<b>0,59</b>	<b>6,74</b>	–	<b>1,41</b>
HO-CH <sub>2</sub> -OH	81,0–83,0	0,37	–	0,59	2,15	–	1,41
HO-CH <sub>2</sub> -O-CH <sub>2</sub> -OH	85,0–87,0	1,43	–	–	4,59	–	–
<b>Ароматическое кольцо   Aromatic ring</b>	–	<b>71,39</b> <b>100</b>	<b>74,63</b> <b>100</b>	<b>67,31</b> <b>100</b>	<b>62,50</b> <b>100</b>	<b>65,76</b> <b>100</b>	<b>63,95</b> <b>100</b>

Свободное <i>ortho</i> -положение   Free <i>ortho</i> -position	115,0–119,0	23,66	13,14	7,67	9,52	1,05	–
C2–C6	127,6–133,9	64,50	74,63	80,40	80,05	86,45	89,10
C1	152,0–164,0	11,84	12,23	11,93	10,43	12,50	10,90
<b>Прочее   Other</b>		<b><math>\frac{0,07}{100}</math></b>	<b><math>\frac{0,05}{100}</math></b>	<b><math>\frac{0,19}{100}</math></b>	–	–	–
Формиат-ион   Formiate ion		100	100	100	–	–	–
<b>Итого   The amount</b>	–	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

На *первой стадии синтеза* присутствие сигналов эфирных структур и свободного формальдегида в ЛФФС при наличии достаточно высокой доли свободных реакционных центров в *ortho*-положении может свидетельствовать о низкой реакционной способности системы «фенол–формальдегид», обусловленной пониженным содержанием NaOH в реакционной смеси. На спектре преконденсата наблюдается большое количество метилольных групп, что указывает на наличие практически чистых фенолоспиртов. Низкое значение доли метиленовых связей свидетельствует о незначительной поликонденсации.

В ЛФФС на *первой стадии синтеза* содержание свободных *ortho*-положений ароматического кольца в 2,5 раза ниже, чем в ФФС, при этом содержание свободного формальдегида в 3,7 раз больше, что подтверждает предположение о взаимодействии ЛСТ с формальдегидом и его более низкой реакционной способности по сравнению с фенолом. Количество метиленовых связей в преконденсатах смол практически одинаковое. Значительное увеличение доли метиленового углерода на *первой стадии синтеза* у ЛФФС по сравнению с ФФС обусловлено пониженным содержанием фенола в реакционной смеси.

Процесс поликонденсации фенолоспиртов протекает главным образом на *второй стадии синтеза*, это демонстрируется значительным увеличением доли метиленовых связей (более чем в 13 раз по сравнению с *первой стадией*). Увеличение доли метиленовых связей в ЛФФС и ФФС на *второй стадии* происходит практически одинаково, но в ФФС соотношение метиленовых связей *para-para'* :

*ortho-para'* составляет 1 : 0,80, что указывает на преобладание олигомеров, состоящих из двух остатков фенола, соединённых метиленовыми связями *para-para'*. В ЛФФС на *второй стадии синтеза* происходит образование олигомеров, состоящих из трёх остатков фенола, соединённых метиленовыми связями *para-para'* и *ortho-para'*; соотношение метиленовых связей *para-para'* : *ortho-para'* становится равным 1 : 1,13, что позволяет косвенно судить об более высокой по сравнению с ФФС молекулярной массе образующихся олигомеров. В ФФС доля метиленового углерода на *второй стадии синтеза* увеличивается только на 2 % по сравнению с *первой стадией*, а ЛФФС доля метиленового углерода снижается на 9 %, Исчезновение сигналов эфирных фрагментов и свободного формальдегида указывает на продолжение реакции метилолирования на *второй стадии синтеза* ЛФФС. Однако, наличие в реакционной смеси сигналов свободного *ortho*-положения ароматического кольца и значительное снижение доли метиленового углерода свидетельствует о вероятном взаимодействии свободного формальдегида с ЛСТ. Содержание свободных *ortho*-положений ароматического кольца в ЛФФС в 12,5 раз ниже, чем у ФФС; присоединяющийся к олигомерам лигнина в виде метилольных групп метиленовый углерод становится невидим для спектроскопии.

Процесс поликонденсации ЛФФ-олигомеров продолжается на *третьей стадии синтеза*, об этом свидетельствует практически неизменившаяся (по сравнению со *второй стадией*) доля метилольных групп и увеличившееся (на 4 %) количество метиленовых связей *ortho-para'* по отношению к связям

*para-para'* (1 : 1,19). В ФФС также можно наблюдать продолжение процесса поликонденсации, количество метиленовых связей *орто-пара'* по отношению к связям *пара-пара'* достигает значения 1 : 1,0, происходит образование олигомеров с большей молекулярной массой, при этом содержание связей *орто-CH<sub>2</sub>-пара'* не является достаточным для качественной смолы (*орто-пара'* : *пара-пара'* должно быть больше 1 : 1,0), что в совокупности с низкой условной вязкостью (табл. 2) указывает на недостаточную глубину поликонденсации. Перед третьей стадией синтеза в реакционную смесь вводят вторую порцию параформа, что приводит к появлению

свободного формальдегида и увеличению доли метиленового углерода (по сравнению со второй стадией на 5 %). Наличие свободного формальдегида в ЛФФС (по сравнению с ФФС больше в 2,4 раза) обусловлено также отсутствием свободных реакционных центров ароматических колец.

С использованием синтезированной смолы были изготовлены древесностружечные плиты. Результаты физико-механических испытаний (табл. 4) полученных плит позволяют оценить влияние лигнина и пониженного содержания щелочи в реакционной смеси на свойства готовой продукции.

Таблица 4

Физико-механические показатели древесностружечных плит

Table 4

Physical and mechanical properties of particle boards

Наименование показателя	Значение показателя   The value of the parameters	
	ФФС   PF resin	ЛФФС   LPF resin
Прочность при изгибе, МПа   Bending strength, МПа	22,7	27,3
Прочность при растяжении, МПа   Internal bonding strength, МПа	0,15	0,28
Разбухание по толщине, %   Thickness swelling, %		
• в холодной воде за 24 ч   in cold water for 24 hr	36	37
• в кипящей воде за 1 ч   • in boiling water for 1 hr	72	72
Водопоглощение, %   Water absorption, %		
• в холодной воде за 24 ч   in cold water for 24 hr	96	99
• в кипящей воде за 1 ч   • in boiling water for 1 hr	109	116
Содержание формальдегида, мг/100 г   Formaldehyde content, mg/100 g	0,50	0,16

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Результаты физико-механических испытаний изготовленных плит позволяют утверждать о достаточно высоком качестве древесных композиционных материалов, получаемых при использовании ЛФФС. Частичная замена фенола на лигнин позволила улучшить предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти на 87 % и прочность при изгибе на 20 %, при этом по показателям водостойкости плиты с ЛФФС незначительно уступают плитам с ФФС, а содержание свободного формальдегида снижается в 3 раза. Плиты с ЛФФС обладают высокой прочностью внутреннего (предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти) и наружных слоёв (прочность при изгибе) и соответствуют по этим показателям требованиям ГОСТ 10632–2014 «Плиты древесно-стружечные. Технические условия». Полученные плиты выдерживают кипячение, что говорит о высокой водостойкости отвер-

там с ФФС, а содержание свободного формальдегида снижается в 3 раза. Плиты с ЛФФС обладают высокой прочностью внутреннего (предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти) и наружных слоёв (прочность при изгибе) и соответствуют по этим показателям требованиям ГОСТ 10632–2014 «Плиты древесно-стружечные. Технические условия». Полученные плиты выдерживают кипячение, что говорит о высокой водостойкости отвер-

ждённого лигнофенолоформальдегидного полимера. Хорошие показатели прочности и водостойкости полученного материала указывают на образование лигнофенолоформальдегидного полимера с густой сетчатой структурой и достаточно большим количеством поперечных сшивок, что подтверждает результаты химического анализа смолы. Низкое содержание свободного формальдегида позволяет отнести изготовленную плиту к классу эмиссии формальдегида E0,5.

ИК-спектры отверждённых образцов, представленные на рис. 2 и 3, содержат все сигналы, характерные на ФФС, отличаясь, главным образом, в областях 1450, 1120 и 1020  $\text{см}^{-1}$ .

Значительное снижение интенсивности полосы поглощения в области 1450  $\text{см}^{-1}$  (валентные колебания C–H в ароматическом кольце) у ЛФФС мо-

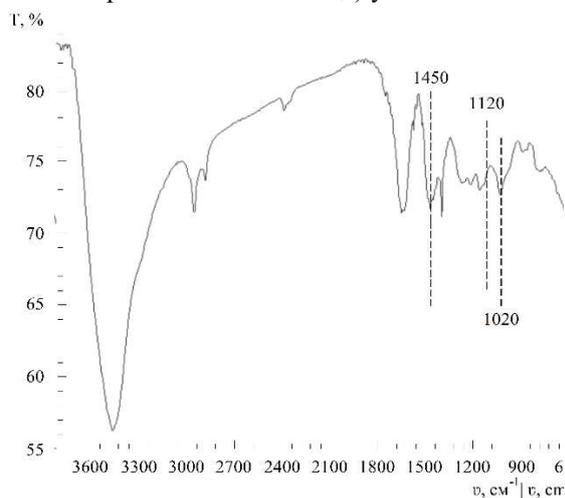


Рисунок 2. ИК-спектр отверждённой фенолоформальдегидной смолы.

Figure 2. FTIR spectra of PF resins

Источник: собственная композиция автора  
Source: author composition

## Обсуждение

Проблемой поиска недорогой и экологичной замены фенола, при синтезе термореактивных смол, занимается достаточно большое количество учёных. Исследования лигнофенолоформальдегидных смол занимают особую роль в этом направлении. В соответствии с поставленной задачей автором выполнены испытания синтезированной лигнофенолофор-

жет обуславливаться как сниженным общим количеством ароматических колец, что согласуется с данными количественного анализа ЯМР  $^{13}\text{C}$ , так и с большим количеством образовавшихся поперечных сшивок в отверждённых образцах ЛФФС. На спектрах ЛФФС также значительно снижена интенсивность сигналов в области 700-900  $\text{см}^{-1}$ , характерных для связи C–H в 2,4-замещённом ароматическом кольце. Резкое снижение интенсивности полосы поглощения в области 1020  $\text{см}^{-1}$ , характерной для OH-метилольных групп, и появление на спектре ЛФФС полосы поглощения в области 1120  $\text{см}^{-1}$  (валентные колебания связи C–O диметиленэфирных связей) свидетельствуют об образовании полимера с густой сетчатой структурой [30]. В ЛФФС большая часть метилольных групп вступает в реакцию между собой, образуя при этом диметиленэфирные связи.

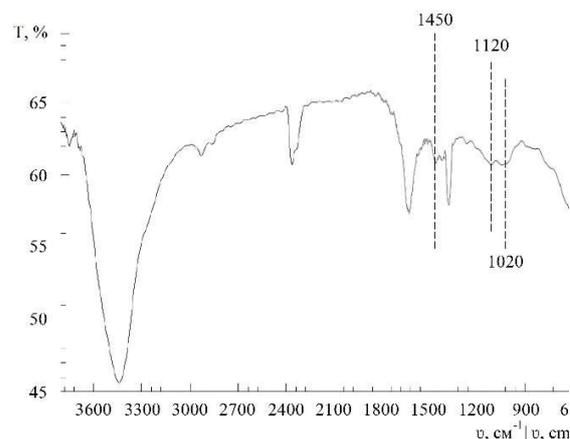


Рисунок 3. ИК-спектр отверждённой лигнофенолоформальдегидной смолы.

Figure 3. FTIR spectra of LPF resins

Источник: собственная композиция автора  
Source: author composition

мальдегидной смолы, в результате которых определён не только качественный, но и количественный состав реакционной смеси на трёх разных этапах, а также проанализированы ИК-спектры отверждённых образцов смолы.

После изучения литературных данных и проведения предварительных экспериментов была подобрана наиболее подходящая, по мнению автора, рецептура лигнофенолоформальдегидной смолы и

её режимы синтеза, что позволило получить клеящую смолу, близкую по своим физико-механическим характеристикам к промышленным смолам марок СФЖ-3011, СФЖ-3013 и СФЖ-3014, используемым для изготовления древесностружечных плит и фанеры. Дополнительное увеличение продолжительности выдержки реакционной смеси при температуре 96–98 °С позволит улучшить некоторые характеристики смолы: повысить условную вязкость, снизить содержание свободного фенола и формальдегида в готовой смоле.

Анализ литературных источников со схожими исследованиями в области изучения фенолоформальдегидных и лигнофенолоформальдегидных смол позволил провести химический анализ структуры синтезированной смолы и выделить сигналы, а также типы связей определённых функциональных групп. В синтезированной ЛФФС соотношение метиленовых связей *para-para'* : *ortho-para'* соответствует 1 : 1,19, по данным исследования [27] наиболее качественными являются ФФС с соотношением метиленовых связей *para-para'* : *ortho-para'* от 1 : 1,3 до 1 : 1,6. Увеличение продолжительности стадии выдержки реакционной смеси при высокой температуре (96...98 °С) позволит получить лигнофенолоформальдегидные олигомеры с более высокой молекулярной массой, и, следовательно улучшить показатели синтезированных смол.

Аналогично, в исследованиях М. Ghorbani et al., (2017) [31] установлено значительное влияние замещения доли фенола техническими препаратами лигнина на свойства синтезированных смол. Лигнофенолоформальдегидные смолы с замещением от 30 % и более фенола на лигносульфонаты по своим физико-механическим и химическим характеристикам довольно сильно отличаются от промышленных клеящих фенолоформальдегидных смол.

При том, что по результатам физико-химических испытаний синтезированная лигнофенолоформальдегидная смола ни по одному параметру не соответствует требованиям ГОСТ (для ФФС марок СФЖ-3011, СФЖ-3013 и СФЖ-3014), изготовленные с её использованием ДСтП обладают хорошими физико-механическими показателями. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том,

что низкие показатели смолы не указывают на её непригодность для изготовления древесных композиционных материалов. Для ЛФФС необходимо разрабатывать собственные нормативные документы (ГОСТ или ТУ). Так вязкость, содержание щелочи и свободного формальдегида для ЛФФС, необходимые для получения качественных древесных композиционных материалов, могут отличаться от требований к ФФС.

Отличительной особенностью исследования является подробное изучение преобразований, протекающих в химической структуре синтезируемой смолы на каждом этапе синтеза. Анализ спектров ЯМР <sup>13</sup>С проведённый для образцов не только готовой смолы, как это происходит у других исследователей, но и проб после двух промежуточных стадий синтеза, позволил наблюдать за химическими превращениями на каждой стадии.

Результаты исследований степени замещения фенола препаратами лигнина и изменений режимов синтеза на свойства синтезированных смол и древесных материалов на их основе помогут получить материалы высокого качества при высоком содержании лигнина в реакционной смеси. Наиболее вероятными способами дополнительного модифицирования можно считать: увеличение содержания лигнина в смоле; изменения продолжительности стадии выдержки реакционной смеси при высокой температуре; снижение массы вводимого формальдегида (особенно второй порции); подбор отвердителя, позволяющего дополнительно улучшить свойства получаемых древесных композиционных материалов.

### Заключение

Полученная лигнофенолоформальдегидная смола (ЛФФС) относится к категории среднещелочных смол. Изменение режимов синтеза, снижение содержания гидроксида натрия в реакционной смеси, а также замещение доли фенола лигнином привели к получению смолы с низким показателем условной вязкости и повышенным содержанием свободных фенола и формальдегида.

Результаты спектроскопии ЯМР <sup>13</sup>С позволяют предположить взаимодействие формальдегида

с лигносульфонатом натрия на второй стадии синтеза при выдержке реакционной смеси при высокой температуре (96–98 °С) и практически полном отсутствии свободных реакционных центров фенола.

В синтезированной ЛФФС полностью отсутствуют свободные реакционные центры в *орто*-положении. Реакционная смесь образована главным образом из олигомеров, состоящих из трёх остатков фенола. Отверждённая ЛФФС образует полимер

с более густой сетчатой структурой и большим количеством диметиленэфирных связей, чем ФФС, что позволяет получить плиты с большей прочностью.

Древесностружечные плиты, полученные и использованием синтезированной ЛФФС, обладают достаточно высокими показателями прочности, удовлетворительной водостойкостью и низким содержанием свободного формальдегида.

### Список литературы

1. Pizzi A., Papadopoulos A.N., Policardi F. Wood composites and their polymer binders. *Polymers*. 2020; 12 (5): 1115. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12051115>
2. Мебельщики сдерживают рост цен / ЛесПромИнформ. 2024, №4 (182). – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6733> (дата обращения: 17.01.2025 г.)
3. Гораев И.М., Чербиева Х.С. Исследование влияния параметров на процесс получения фенолформальдегидных смол / Вестник магистратуры. – 2019. – № 11-1(98). – С. 7–13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41526895>
4. Younesi-Kordkheili H., Pizzi A. Properties of plywood panels bonded with ionic liquid-modified lignin–phenol–formaldehyde resin. *The Journal of Adhesion*. 2017; 94 (2): 143–154. DOI: <https://doi.org/10.1080/00218464.2016.1263945>
5. Yang S., Zhang Y., Yuan T.-Q., Sun R.-C. Lignin-phenol-formaldehyde resin adhesives prepared with biorefinery technical lignins. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015; 132 (36): 42493. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.42493>
6. Kalami S., Chen N., Borazjani H., Nejad M. Comparative analysis of different lignins as phenol replacement in phenolic adhesive formulations. *Industrial Crops and Products*. 2018; 125: 520–528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.09.037>
7. Zhang Y., Li N., Chen Z., Ding C., Zheng Q., Xu J., Meng Q. Synthesis of high-water-resistance lignin-phenol resin adhesive with Furfural as a crosslinking agent. *Polymers*. 2020; 12 (12): 2805. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12122805>
8. Thébault M., Kutuzova L., Jury S., Eicher I., Zikulnig-Rusch E., Kandelbauer A. Effect of phenolation, lignin-type and degree of substitution on the properties of lignin-modified phenol-formaldehyde impregnation resins: molecular weight distribution, wetting behavior, rheological properties and thermal curing profiles. *J Renew Mater*. 2020;8 (6): 603–630. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2020.09616>
9. Balea Paul G., Timar M. C., Zeleniuc O., Lunguleasa A., Cosoreanu, C. Mechanical properties and formaldehyde release of particleboard made with lignin-based adhesives. *Appl. Sci*. 2021; 11: 8720. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11188720>
10. Solt P., Rößiger B., Konnerth J., van Herwijnen H. Lignin phenol formaldehyde resoles using base-catalysed depolymerized kraft lignin. *Polymers*. 2018; 10 (10): 1162. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10101162>
11. Qiao W., Li S., Guo G., Han S., Ren S., Ma Y. Synthesis and characterization of phenol-formaldehyde resin using enzymatic hydrolysis lignin. *Journal of industrial and engineering chemistry*. 2015; 21: 1417–1422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.06.016>
12. Hemmilä V., Adamopoulos S., Karlsson O., Kumar A. Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels. A Review. *RSC Advances*. 2017; 7 (61): 38604–38630. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7ra06598a>

13. Евстигнеев Э. И. Проблемы валоризации лигнина (обзор) // Химия растительного сырья. – 2022. – № 1. – С. 11-33. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2022019211>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48327951>
14. Eraghi Kazzaz A., Hossein Pour Feizi Z., Fatehi P. Grafting strategies for hydroxy groups of lignin for producing materials. *Green Chemistry*. 2019; 22: 28488. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9gc02598g>
15. Ghorbani M., Liebner F., Van Herwijnen H.W.G., Pfungen L., Krahofer M., Budjav E., Konnerth J. Lignin phenol formaldehyde resoles: The impact of lignin type on adhesive properties. *BioResources*. 2016; 11 (3). DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.6727-6741>
16. Кожевников А.Ю., Шестаков С.Л., Сыпалова Ю.А. Вопросы структурной организации лигнина и перспективы его переработки. *Химия растительного сырья*. – 2023. – № 2. – С. 5–26. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211737>
17. Aro, T., Fatehi, P. Production and Application of Lignosulfonates and Sulfonated Lignin. *ChemSusChem*. 2017; 10(9): 1861–1877. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.20170008>
18. Gonçalves S., Ferra J., Paiva N., Martins J., Carvalho L.H., Magalhães F.D. Lignosulphonates as an alternative to non-renewable binders in wood-based materials. *Polymers*. 2021; 13 (23): 4196. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13234196>
19. Ghorbani M., Konnerth J., van Herwijnen H.W.G., Zinovyev G., Budjav E., Requejo Silva A., Liebner F. Commercial lignosulfonates from different sulfite processes as partial phenol replacement in PF resole resins. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017; 135(8): 45893. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.45893>
20. Тептерева Г.А. Совершенствование технологий получения и применения лигносульфонатов в качестве сырьевой основы реагентов для добычи углеводородов : специальность 07.00.10 «История науки и техники», 02.00.13 «Нефтехимия» : дис. ... д. т. наук : защищена 27.12.2019 / Тептерева Галина Алексеевна ; Уфимский гос. нефт. техн. ун-т. – Уфа, 2019. – 330 с.
21. Melro E., Antunes F., Valente A., Duarte H., Romano A., Medronho B. On the development of phenol-formaldehyde resins using a new type of lignin extracted from pine wood with a levulinic-acid based solvent. *Molecules*. 2022; 27 (9): 2825. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27092825>.
22. Thébault M., Li Ya, Beuc C., Frybort S., Zikulnig-Rusch E., Kutuzova L., Kandelbauer A. Impregnated paper-based decorative laminates prepared from lignin-substituted phenolic resins. *Journal of renewable materials*. 2020; 8 (10): 1181–1198. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2020.09755>.
23. Zakusilo D.N., Evstigneyev E.I., Ivanov A.YU., Mazur A.S., Bessonova E.A., Mammeri O.A., Vasilyev A.V. Structure of oxidized hydrolysis lignin. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2023; 43 (2): 103-115. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773813.2023.2187064>
24. Nishida M., Tanaka T., Miki T., Hayakawa Y., Kanayama K. Integrated analysis of solid-state NMR spectra and nuclear magnetic relaxation times for the phenol formaldehyde (PF) resin impregnation process into soft wood. *RSC Advances*. 2017; 7 (86): 54532–54541. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7ra11295e>
25. Matsushita Y. Conversion of technical lignins to functional materials with retained polymeric properties. *Journal of Wood Science*. 2015; 61 (3): 230–250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1470-2>
26. Gong X., Meng Y., Lu J., Tao Y., Cheng Y., Wang H. A Review on Lignin-Based Phenolic Resin Adhesive. *Macromol. Chem. Phys*. 2022; 223: 2100434. DOI: <https://doi.org/10.1002/macp.202100434>
27. Иванов Д.В., Глазунова М.Г., Калашников А.А. Структура и свойства фенолоформальдегидных смол, синтезированных при разных содержаниях щелочив реакционной смеси // Журнал прикладной химии. – 2024; – Т. 97 (№ 2). – С. 148–160. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0044461824020051>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68570054>
28. Васильев В.В. Экспресс-метод определения содержания формальдегида в древесных плитах. Бюллетень Ассоциации ЛЕСТЕХ. – 2024; – № 3 (17). – С. 32–35. EDN: EQCBGO

29. Кондратьев В.П. Синтетические клеи для древесных материалов : химия и технология. Оборудование. Методы получения. Физико-технические свойства. Способы модификации. Условия применения / В.П. Кондратьев, В.И. Кондращенко; под ред. В.П. Кондратьева; ЗАО «Центр. науч.-исслед. ин-т фанеры», Моск. гос. ун-т путей сообщ. – Москва : Науч. мир, 2004. – ISBN 5-89176-284-6. – EDN QNJGGT.

30. Жаббаров Т.А. Современные методы модификации феноло-формальдегидных олигомеров // *Universum: химия и биология: электрон. научн. журн.* – 2021; – 6 (84). Режим доступа: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/11718>

31. Ghorbani M., Mahendran A.R., van Herwijnen H.W.G., Liebner F., Konnerth J. Paper-based laminates produced with kraft lignin-rich phenol–formaldehyde resoles meet requirements for outdoor usage. *European Journal of Wood and Wood Products.* 2017; 76 (2): 481–487. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1248-x>

### References

1. Pizzi A., Papadopoulos A.N., Policardi F. Wood composites and their polymer binders. *Polymers.* 2020; 12 (5): 1115. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12051115>

2. Mebel'shchiki sderzhivayut rost tsen. [Furniture makers restrain price growth] / *LesPromInform.* 2024, №4 (182). URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6733> (in Russ.)

3. Goraev I.M., Cherbieva Kh.S. *Issledovanie vliyaniya parametrov na protsess polucheniya fenolformal'degidnykh smol.* [Investigation of the effect of parameters on the process of obtaining PF resins]. *Vestnik magistratury.* 2019; № 11-1 (98): 7–13. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41526895>

4. Younesi-Kordkheili H., Pizzi A. Properties of plywood panels bonded with ionic liquid-modified lignin–phenol–formaldehyde resin. *The Journal of Adhesion.* 2017; 94 (2): 143–154. DOI: <https://doi.org/10.1080/00218464.2016.1263945>

5. Yang S., Zhang Y., Yuan T.-Q., Sun R.-C. Lignin-phenol-formaldehyde resin adhesives prepared with biorefinery technical lignins. *Journal of Applied Polymer Science.* 2015; 132 (36): 42493. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.42493>

6. Kalami S., Chen N., Borazjani H., Nejad M. Comparative analysis of different lignins as phenol replacement in phenolic adhesive formulations. *Industrial Crops and Products.* 2018; 125: 520–528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.09.037>

7. Zhang Y., Li N., Chen Z., Ding C., Zheng Q., Xu J., Meng Q. Synthesis of high-water-resistance lignin-phenol resin adhesive with Furfural as a crosslinking agent. *Polymers.* 2020; 12 (12): 2805. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12122805>

8. Thébault M., Kutuzova L., Jury S., Eicher I., Zikulnig-Rusch E., Kandelbauer A. Effect of phenolation, lignin-type and degree of substitution on the properties of lignin-modified phenol-formaldehyde impregnation resins: molecular weight distribution, wetting behavior, rheological properties and thermal curing profiles. *J Renew Mater.* 2020;8 (6): 603–630. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2020.09616>

9. Balea Paul G., Timar M. C., Zeleniuc O., Lunguleasa A., Cosoreanu, C. Mechanical properties and formaldehyde release of particleboard made with lignin-based adhesives. *Appl. Sci.* 2021; 11: 8720. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11188720>

10. Solt P., Röbiger B., Konnerth J., van Herwijnen H. Lignin phenol formaldehyde resoles using base-catalysed depolymerized kraft lignin. *Polymers.* 2018; 10 (10): 1162. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10101162>

11. Qiao W., Li S., Guo G., Han S., Ren S., Ma Y. Synthesis and characterization of phenol-formaldehyde resin using enzymatic hydrolysis lignin. *Journal of industrial and engineering chemistry.* 2015; 21: 1417–1422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.06.016>

12. Hemmilä V., Adamopoulos S., Karlsson O., Kumar A. Development of sustainable bio-adhesives for engineered wood panels. A Review. *RSC Advances.* 2017; 7 (61): 38604–38630. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7ra06598a>

13. Evstigneev E.I. *Problemy valorizatsii lignina (obzor)*. [Problems of lignin valorization (review)]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2022; № 1: 11-33. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2022019211>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48327951>
14. Eraghi Kazzaz A., Hossein Pour Feizi Z., Fatehi P. Grafting strategies for hydroxy groups of lignin for producing materials. *Green Chemistry*. 2019; 22: 28488. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9gc02598g>
15. Ghorbani M., Liebner F., Van Herwijnen H.W.G., Pfungen L., Krahofer M., Budjav E., Konnerth J. Lignin phenol formaldehyde resoles: The impact of lignin type on adhesive properties. *BioResources*. 2016; 11 (3). DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.11.3.6727-6741>
16. Kozhevnikov A.Yu., Shestakov S.L., Sypalova Yu.A. *Voprosy strukturnoi organizatsii lignina i perspektivy ego pererabotki* [Questions of the structural organization of lignin and the prospects of processing]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*. 2023; № 2: 5–26. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.14258/jerm.20230211737>
17. Aro, T., Fatehi, P. Production and Application of Lignosulfonates and Sulfonated Lignin. *ChemSusChem*. 2017; 10(9): 1861–1877. DOI: <https://doi.org/10.1002/cssc.201700008>
18. Gonçalves S., Ferra J., Paiva N., Martins J., Carvalho L.H., Magalhães F.D. Lignosulphonates as an alternative to non-renewable binders in wood-based materials. *Polymers*. 2021; 13 (23): 4196. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13234196>
19. Ghorbani M., Konnerth J., van Herwijnen H.W.G., Zinoviyev G., Budjav E., Requejo Silva A., Liebner F. Commercial lignosulfonates from different sulfite processes as partial phenol replacement in PF resole resins. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017; 135(8): 45893. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.45893>
20. Teptereva G.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii polucheniya i primeneniya lignosul'fonatov v kachestve syr'evoi osnovy reagentov dlya dobychi uglevodorodov* [Improvement of technologies for the production and use of lignosulfonates as the raw material base of reagents for the extraction of hydrocarbons] : spetsial'nost' 07.00.10 «Istoriya nauki i tekhniki», 02.00.13 «Neftekhimiya» : dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk : zashchishchena 27.12.2019 / Teptereva Galina Alekseevna ; Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet. – Ufa, 2019. – 330 p.
21. Melro E., Antunes F., Valente A., Duarte H., Romano A., Medronho B. On the development of phenol-formaldehyde resins using a new type of lignin extracted from pine wood with a levulinic-acid based solvent. *Molecules*. 2022; 27 (9): 2825. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27092825>
22. Thébault M., Li Ya, Beuc C., Frybort S., Zikulnig-Rusch E., Kutuzova L., Kandelbauer A. Impregnated paper-based decorative laminates prepared from lignin-substituted phenolic resins. *Journal of renewable materials*. 2020; 8 (10): 1181–1198. DOI: <https://doi.org/10.32604/jrm.2020.09755>
23. Zakusilo D.N., Evstigneyev E.I., Ivanov A.YU., Mazur A.S., Bessonova E.A., Mammeri O.A., Vasilyev A.V. Structure of oxidized hydrolysis lignin. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2023; 43 (2): 103-115. DOI: <https://doi.org/10.1080/02773813.2023.2187064>
24. Nishida M., Tanaka T., Miki T., Hayakawa Y., Kanayama K. Integrated analysis of solid-state NMR spectra and nuclear magnetic relaxation times for the phenol formaldehyde (PF) resin impregnation process into soft wood. *RSC Advances*. 2017; 7 (86): 54532–54541. DOI: <https://doi.org/10.1039/c7ra11295e>
25. Matsushita Y. Conversion of technical lignins to functional materials with retained polymeric properties. *Journal of Wood Science*. 2015; 61 (3): 230–250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1470-2>
26. Gong X., Meng Y., Lu J., Tao Y., Cheng Y., Wang H. A Review on Lignin-Based Phenolic Resin Adhesive. *Macromol. Chem. Phys*. 2022; 223: 2100434. DOI: <https://doi.org/10.1002/macp.202100434>
27. Ivanov D.V., Glazunova M.G., Kalashnikov A.A. *Struktura i svoystva fenoloformal'degidnykh smol, sintezirovannykh pri raznykh sodержaniyakh shchelochiv reaktsionnoi smesi* [Structure and properties of phenol-formaldehyde resins synthesized at different alkali contents]. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2024; T. 97 (№ 2): 148–160. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0044461824020051>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=68570054>

28. Vasil'ev V.V. *Ekspress-metod opredeleniya sodержaniya formal'degida v drevesnykh plitakh*. [Express method for determining the formaldehyde content in wood board]. Byulleten' Assotsiatsii LESTEKh. 2024; № 3 (17): 32–35.

29. Kondrat'ev V.P. *Sinteticheskie klei dlya drevesnykh materialov : khimiya i tekhnologiya. Oborudovanie. Metody polucheniya. Fiziko-tekhnicheskie svoistva. Sposoby modifikatsii. Usloviya primeneniya*. [Synthetic adhesives for wood materials: chemistry and technology. Technique. Methods. Properties. Modification. Terms of use] / V.P. Kondrat'ev, V.I. Kondrashchenko; pod red. V.P. Kondrat'eva; ZAO «Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut fanery», Moskovskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniya – Moscow: Nauchnyi mir, 2004. – ISBN 5-89176-284-6. – EDN QNJGGT.

30. Zhabbarov T.A. *Sovremennye metody modifikatsii fenolo-formal'degidnykh oligomerov*. [Modern methods of modification of phenol-formaldehyde oligomers]. Universum: khimiya i biologiya : elektronnyi nauchnyi zhurnal. 2021; 6 (84). (in Russ.). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/11718>

31. Ghorbani M., Mahendran A.R., van Herwijnen H.W.G., Liebner F., Konnerth J. Paper-based laminates produced with kraft lignin-rich phenol–formaldehyde resoles meet requirements for outdoor usage. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2017; 76 (2): 481–487. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1248-x>

### Сведения об авторе

*Глазунова Маргарита Геннадьевна* – аспирант кафедры технологии древесных и целлюлозных композиционных материалов Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова. Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация. SPIN-код: 9753-1150. ORCID: [orcid.org/0000-0003-0778-6205](https://orcid.org/0000-0003-0778-6205). E-mail: [rita.mg.1212@yandex.ru](mailto:rita.mg.1212@yandex.ru)

### Information about the author

*Margarita G. Glazunova* – PhD student of the Department of Technology of Wood and Cellulose Composite Materials at St. Petersburg State Forestry University named after S. M. Kirov. Institutskiy Lane, 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation. SPIN-код: 9753-1150. ORCID: [orcid.org/0000-0003-0778-6205](https://orcid.org/0000-0003-0778-6205). E-mail: [rita.mg.1212@yandex.ru](mailto:rita.mg.1212@yandex.ru)



## Декоративные планки с имитацией текстуры дуба из древесины мягких лиственных пород

Александр А. Лукаш<sup>1</sup>✉, [mr.luckasch@yandex.ru](mailto:mr.luckasch@yandex.ru) <http://orcid.org/0000-0002-5675-6304>

Алексей А. Пыкин<sup>1</sup>, [alexem87@yandex.ru](mailto:alexem87@yandex.ru) <http://orcid.org/0000-0003-1369-4884>

Виктор А. Романов<sup>1</sup>, [vromanov62@mail.ru](mailto:vromanov62@mail.ru) <http://orcid.org/0009-0006-1794-7956>

Дмитрий М. Максименко<sup>1</sup>, [ttazikofficial@mail.ru](mailto:ttazikofficial@mail.ru) <http://orcid.org/0009-0009-7342-5687>

Олег Н. Чернышев<sup>2</sup>, [olegch62@mail.ru](mailto:olegch62@mail.ru) <http://orcid.org/0000-0001-9396-1246>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Ст. Димитрова, 3а, г. Брянск, 241037, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы получения композиционных отделочных материалов из древесины мягких лиственных пород с текстурой, имитирующей текстуру дуба. Выявлено, что наша страна значительно отстает от уровня доходности лесопромышленного комплекса от уровня доходности передовых промышленно развитых стран. Сформировано условие повышения доходности лесопромышленного комплекса путем увеличения объемов переработки древесины мягких лиственных пород и создания из нее продукции с улучшенными эксплуатационными свойствами. Проанализированы способы изготовления отделочных композиционных материалов из древесины мягколиственных пород, предложено применять чередование листов лущеного шпона разных пород и цвета, что обеспечивает формирование ярко выраженной текстуры. Показано, что предложенный, импортозамещающий способ обеспечивает изготовление отделочных материалов из древесины мягких лиственных пород, имитирующих текстуру древесины ценных твердолиственных пород. Обосновано, что в отличие от зарубежной технологии «файн-лайн» крашение шпона не требуется, а это упрощает технологический процесс и улучшает экологию. Показано, что древесина мягких лиственных пород применяется ограниченно из-за низких прочностных показателей, которые определяются плотностью. Исследовано влияния продолжительности склеивания; толщины пакета и температуры плит пресса на плотность образцов по плану Бокса (ВЗ). Проведена статистическая обработка, построены графические зависимости с помощью компьютерных программ PlanExp B-D13, Excel и SigmaPlot. **Получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость** плотности декоративных планок от условий склеивания: продолжительности прессования, толщины пакета шпона и температуры плит пресса. Установлена возможность получения декоративных планок из древесины мягких лиственных пород повышенной плотности. Выявлено, что наибольшее влияние на целевую функцию оказывают продолжительность прессования и толщина пакета шпона, а максимальное значение плотности - 830 кг/м<sup>3</sup> достигает при продолжительности прессования 8 мин и толщине пакета шпона – 13,5 мм. Учитывая, что в структуре себестоимости продукции затраты на сырье составляют около 30%, применение данного способа обеспечит снижение производственных затрат при изготовлении продукции. Предложенный авторами способ изготовления композиционных отделочных материалов является экономически выгодным: стоимость 1 м<sup>3</sup> сырья дуба – 70 000 руб., стоимость 1 м<sup>3</sup> сырья березы 5 000 руб.

**Ключевые слова:** отделочный материал, лущеный шпон, лиственные породы, склеивание, декоративная планка, текстура.

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Лукаш А. А., Пыкин А. А., Романов В.А., Максименко Д.М., Чернышев О. Н. Декоративные планки с имитацией текстуры дуба из древесины мягких лиственных пород // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 91-103. – Библиогр.: с. 99-102 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/6>.

*Поступила* 04.12.2024. *Пересмотрена* 02.01.2025. *Принята* 05.02.2025. *Опубликована онлайн* 24.03.2025.

*Article*

## Decorative slats with imitation oak texture made of soft hardwood

**Alexander A. Lukash**<sup>1</sup>✉, [mr.luckasch@yandex.ru](mailto:mr.luckasch@yandex.ru)  <http://orcid.org/0000-0002-5675-6304>

**Alexey A. Pykin**<sup>1</sup>, [alexem87@yandex.ru](mailto:alexem87@yandex.ru)  <http://orcid.org/0000-0003-1369-4884>

**Victor A. Romanov**<sup>1</sup>, [vromanov62@mail.ru](mailto:vromanov62@mail.ru)  <http://orcid.org/0009-0006-1794-7956>

**Dmitry M. Maksimenko**<sup>1</sup>, [ttazikofficial@mail.ru](mailto:ttazikofficial@mail.ru)  <http://orcid.org/0009-0009-7342-5687>

**Oleg N. Chernyshev**<sup>2</sup>, [olegch62@mail.ru](mailto:olegch62@mail.ru)  <http://orcid.org/0000-0001-9396-1246>

<sup>1</sup>FSBEI HE «Bryansk State Engineering and Technology University», St. Dimitrova Avenue, 3a, Bryansk, 241037, Russian Federation

<sup>2</sup>FSBEI HE «Ural State Forest Engineering University», Sibirsky trakt str., 37, Ekaterinburg, 620100, Russian Federation

### Abstract

The issues of obtaining composite finishing materials from soft-leaf wood with a texture imitating the texture of oak are considered. It has been revealed that our country is significantly lagging behind the profitability level of the timber industry and the profitability level of advanced industrialized countries. A condition has been formed for increasing the profitability of the timber industry by increasing the volume of processing soft hardwood and creating products with improved operational properties from it. The methods of manufacturing finishing composite materials from soft-leaved wood are analyzed, and it is proposed to use alternating sheets of peeled veneer of different breeds and colors, which ensures the formation of a pronounced texture. It is shown that the proposed import-substitution method provides the production of finishing materials from soft hardwood, imitating the texture of valuable hardwood wood. It is shown that the proposed import-substituting method provides the manufacture of finishing materials from soft hardwood, imitating the texture of valuable hardwood wood. It is proved that, unlike foreign fine-line technology, veneer dyeing is not required, and this simplifies the technological process and improves the environment. It is shown that soft hardwood is used to a limited extent due to low strength parameters, which are determined by density. The effect of the bonding time; the thickness of the package and the temperature of the press plates on the density of samples according to the Box plan (B3) was studied. Statistical processing was carried out, graphical dependencies were constructed using computer programs PlanExp B-D13, Excel and SigmaPlot. A regression equation has been obtained that adequately describes the dependence of the density of decorative strips on the bonding conditions: the duration of pressing, the thickness of the veneer package, and the temperature of the press plates. The possibility of obtaining decorative slats from soft hardwood of increased density has been established. It was revealed that the pressing time and the thickness of the veneer package have the greatest effect on the target function, and the maximum density value of 830 kg/m<sup>3</sup> is reached with a pressing duration of 8 minutes and a veneer package thickness of 13.5 mm. Considering that the cost of raw materials in the cost structure is about 30%, the use of this method will ensure a reduction in production costs in the manufacture of products. The method of manufacturing composite finishing materials proposed by the authors is economically advantageous: the cost of 1 m<sup>3</sup> of oak raw materials is 70,000 rubles, the cost of 1 m<sup>3</sup> of birch raw materials is 5,000 rubles.

**Keywords:** *finishing material, peeled veneer, hardwood, gluing, decorative strip, texture.*

**Funding:** this research received no external funding.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Lukash A. A., Pykin A.A., Romanov V.A., Maksimenko D. M., Chernyshev O.N. (2025) Decorative slats with imitation oak texture made of soft hardwood. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 1 (57). pp. 91-103 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/6>.

*Received* 04.12.2024. *Revised* 02.01.2025. *Accepted* 05.02.2025. *Published online* 24.03.2025.

### Введение

Основной проблемой лесного комплекса России является низкий уровень его доходности. Имея самые большие в мире площади лесов, наша страна значительно отстает от уровня доходности передовых промышленно развитых стран. В США доход от их использования лесов составляет 119 млрд долл, а в России это составляет - 0,055 млрд. долл. отмечает М.А. Булгакова (2021) [1]. В Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года, как сказано в Распоряжении Правительства РФ (2021) [2] предусматривается повышение уровня доходности лесопользования. Но возрастающий дефицит хвойных и твердолиственных пород предполагается преодолеть вовлечением в эксплуатацию не достигших возраста рубки древостоев в эксплуатационных лесах, отмечает Ю.Н. Гагарин (2021) [3], что это в дальнейшем усугубит ситуацию. Древесина мягких лиственных пород имеет низкие прочностные и декоративные показатели по сравнению с древесной твердых лиственных пород. Возрастающий дефицит хвойных и твердолиственных пород решается в настоящее время вовлечением в переработку лесов, не достигших возраста спелости. Постоянный рост цен на древесное сырье усугубляет ситуацию и приводит к еще большему дефициту ценной в техническом отношении древесины и росту цен на сырье. Решение проблемы дефицита ценной в техническом отношении древесины возможно при широком вовлечении в переработку древесины мягких лиственных пород и создании из нее продукции с улучшенными эксплуатационными показателями, доказывают исследователи А.А. Лукаш и Н.П. Лукутцова (2021) [4]. В исследованиях авторов М.А. Elesin и др. (2021) [5] и Н.А. Машкин и др. (2021) [6] показывается возможность увеличения прочности шахтной крепи после ее модифицирования.

В трудах авторов И.Ф. Козорез и др. (2020) [7]; автора I.N Kuznetsova. (2021) [8] и авторов И.Н.

Кузнецова и др. (2023) [9] изучены особенности модификации карбамидом древесины мягких лиственных пород и трудно пропитываемых пород использования в малоэтажном домостроении. Исследователь К. В. Жужукин (2023) [10] установил комплексный пропитывающий состав для повышения водо- и биостойкости древесины.

Исследователи О.Н. Чернышев и др. (2024) [11]; Д.О. Чернышев и др. (2024) [12] обосновывают возможность улучшения внешнего вида и эстетики мебельных фасадов созданием поверхностного рельефа. Исследователи Н.А.Тарбеева и др. (2021) [13] отмечают необходимость применения обработки давлением и температурой при изготовлении деревянных облицовочных заготовок.

Из древесины быстрорастущих мягких пород согласно технологии «файн-лайн» изготавливаются отделочные материалы. Имитация красивой ярко выраженной текстуры древесины, как отмечает В.В. Вараксин (2017) [14], производится окрашиванием и чередованием слоев лащеного шпона разного цвета при их склеивании. Для реализации способа изготовления декоративных пластин из лащеного шпона мягких лиственных пород древесины (Пат. 16540 Республика Беларусь) [15] требуется применение пресс-форм сложной конструкции и окрашивание водными красителями лащеного шпона. Таким образом, простого способа, позволяющего получать композиционные материалы с волнистой ярко выраженной структурой (текстурой) не выявлено. Поэтому авторами разработан простой и более совершенный способ изготовления декоративных пластин с ярко выраженной структурой из листов лащеного шпона мягких лиственных пород без их предварительного окрашивания красителями. Проведено исследование условий получения декоративных планок повышенной плотности из древесины мягких лиственных пород.

## Материалы и методы

*Предмет и объект исследований.* Объект исследования – лущеный шпон березы и ольхи. Предмет исследования - композиционные материалы с ярко выраженной структурой. *Проведение эксперимента* для установления зависимости влияния условий склеивания на плотность производилось в гидравлическом прессе марки П-713. Для склеивания применялась смола карбамидоформальдегидная смола (КФС) марки КФ120-65 ТУ2311-001-00252569-94. Плотность в момент испытаний  $\rho_w$ , кг/м<sup>3</sup> определяли

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \cdot b_w \cdot l_w},$$

где  $m_w$  – масса образца, кг;

$a_w, b_w, l_w$  - размеры образца, м.

Исследование влияния продолжительности

склеивания ( $X_1$ ); толщины пакета ( $X_2$ ) и температуры плит пресса ( $X_3$ ) на плотность образцов проводили по плану Бокса (B3). Статистическую обработку и построение графических зависимостей осуществляли с помощью компьютерных программ PlanExp B-D13, Excel и SigmaPlot.

## Результаты

Предлагаемый авторами способ изготовления декоративных пластин с ярко выраженной текстурой из листов лущеного шпона мягких лиственных пород основан на чередовании листов лущеного шпона разного цвета и пород. На рис. 1а показан образец, изготовленный из чередующихся листов лущеного шпона разного цвета, что позволяет имитировать текстуру дуба и других ценных пород.



a/a б/б

Рисунок 1. Внешний вид образца: а - из древесины березы и ольхи образца с волнистой структурой; б - дуба.

Figure 1. The appearance of the sample: a - birch and alder wood, with a wavy structure; b - oak.

Источник: собственные результаты авторов

Source: authors' own scheme

Для установления возможности изготовления изделий повышенной плотности проведено исследование зависимости плотности декоративных планок от параметров режима склеивания.

Постоянные факторы проведения исследования: лущеный шпон из древесины ольхи и березы толщиной 1,5 мм; клей на основе смолы КФ 120-65; расход клея 110...115г/м<sup>2</sup>; давление прессования 2 МПа.

## Деревопереработка. Химические технологии

Значения переменных факторов и уровни их варьирования представлены в табл. 1.

Матрица планирования и результаты проведения приведены в табл. 2. Результаты статистическая обработка экспериментальных данных, которая

проводилась в соответствии с методикой, изложенной в учебном пособии О.Н. Чернышева и др. (2024) [16] представлены в табл. 3.

Таблица 1

Переменные факторы и уровни их варьирования

Table 1

Variable factors and their levels of variation

Факторы/Factors	Обозначения/designation		Интервал варьирования/ The range of variation	Уровни варьирования		
	в натуральном виде/ in kind	в кодированном виде/ in encoded form		Нижний/lower	Основной/main	Верхний/upper
				-1	0	1
Продолжительность прессования, мин/Pressing time, min	$\tau$	$X_1$	1	6	7	8
Толщина пакета шпона, мм/Veneer package thickness, mm	Sp	$X_2$	1,4	10,5	11,9	13,3
Температура, °C/Temperature, °C	T	$X_3$	5	110	115	120

Таблица 2

Матрица планирования и результаты исследований

Table 2

Planning matrix and research results

	Кодированный вид   Code dview			Натуральный вид   Natural appearance			Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>   Density, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\tau$ , мин	Sp, мм	T, °C	
1	-	-	-	6	10,5	110	678
2	+	-	-	8	10,5	110	724
3	-	+	-	6	13,3	110	678
4	+	+	-	8	13,3	110	758
5	-	-	+	6	10,5	120	589,5
6	+	-	+	8	10,5	120	698
7	-	+	+	6	13,3	120	740
8	+	+	+	8	13,3	120	832
9	-	0	0	6	11,9	115	707
10	+	0	0	8	11,9	115	725
11	0	-	0	7	10,5	115	726,7
12	0	+	0	7	13,3	115	800
13	0	0	-	7	11,9	110	769
14	0	0	+	7	11,9	120	769,7
15	0	0	0	7	11,9	115	726

Значимость коэффициентов модели определялась по критерию Стьюдента:

$$t_i = |b_i| / S\{b_i\},$$

где  $b_i$  –  $i$ -й коэффициент ( $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ );

$S\{b_i\}$  – среднеквадратическое отклонение в определении  $b_i$ .

Для выбранного уровня значимости (5 %) и данного числа степеней свободы расчетное значение  $t_i$  сравнивалось с табличным  $t_{\text{табл.}}$ . Коэффициент модели  $b_i$  считается незначимым, если  $t_i$  менее  $t_{\text{табл.}}$ .

Адекватность модели оценивалась по критерию Фишера:

$$F = S_{\text{ад}}^2 / S_{\text{в}}^2,$$

где  $S_{\text{ад}}^2$  – дисперсия адекватности;

$S_{\text{в}}^2$  – дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах.

Значения  $S_{\text{ад}}^2$  и  $S_{\text{в}}^2$  рассчитывались по формуле:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N - n_3} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2;$$

$$S_{\text{в}}^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{u=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{uj} - \bar{y}_u)^2,$$

где  $N$  – количество опытов в эксперименте ( $N=10$ );

$m$  – число параллельных измерений ( $m=3$ );

$n_3$  – количество значимых коэффициентов;

$\bar{y}_u$  – среднее значение прочности в  $u$ -м опыте;

$\hat{y}_u$  – прочность, предсказанная по уравнению;

$y_{uj}$  – прочность в  $u$ -м опыте,  $j$ -м параллельном измерении.

Расчетное значение  $F$  сравнивалось с табличным  $F_{\text{табл.}}$  при значимых коэффициентах. Т.к.  $F$  менее  $F_{\text{табл.}}$ , то модель является адекватной.

Результаты статистической обработки исследования зависимости плотности декоративных планок от параметров режима склеивания приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значимость коэффициентов и адекватность математической модели зависимости плотности декоративных планок от параметров режима склеивания

Table 3

The significance of the coefficients and the adequacy of the mathematical model of the dependence of the density of decorative strips on the parameters of the bonding mode

Статистический показатель/ Statistical indicator	Значение/ Meaning
Дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах ( $S_{\text{в}}^2$ ) / Variance of reproducibility in parallel experiments	0,25
Число степеней свободы / Number of degrees of freedom	10
Табличное значение критерия Стьюдента ( $t_{\text{табл.}}$ ) / Number of degrees of freedom ( $t_{\text{table}}$ )	2,23
Расчетное значение критерия Стьюдента ( $t_i$ ) / Calculated value of Student's criterion ( $t_i$ ) /	4,25
Значения коэффициентов / Insignificant coefficient of the model	
$b_0$	778,44
$b_1, b_2, b_3$	34,45; 39,18; 2,22
$b_{11}, b_{22}, b_{33}$	-45,33; -19,92; -13,32
$b_{12}, b_{13}, b_{23}$	2,2; 9,3; 31,3

Незначимый коэффициент модели ( $t_1$ менее $t_{\text{табл.}}$ ) / Insignificant coefficient of the model (" $t$ " " $I$ " is less than $t_{\text{table}}$ )	b3 (2,22); b12 (2,19)
Дисперсия адекватности ( $S_{\text{ад}}^2$ ) / Adequacy variance (" $S$ " " $ad$ " $^2$ )	0,56
Число степеней свободы при значимых коэффициентах / The number of degrees of freedom with significant coefficients	1
Табличное значение критерия Фишера ( $F_{\text{табл.}}$ ) / Tabular value of the Fischer criterion (" $F$ " " $table$ ")	4,96
Расчетное значение критерия Фишера ( $F$ ) / Calculated value of the Fischer criterion (" $F$ ")	5,46
Адекватность модели ( $F$ менее $F_{\text{табл.}}$ ) / Adequacy of the model (" $F$ " less than $F_{\text{table}}$ )	адекватная / adequate

**Обсуждение**

Регрессионная модель зависимости плотности декоративных планок от параметров режима склеивания (продолжительности прессования, толщины пакета шпона, температуры плит пресса) представлена следующим уравнением регрессии:

$$Y = 778,44 + 34,45X_1 + 39,18X_2 + 2,22X_3 - 45,33X_1^2 - 16,92X_2^2 - 13,32X_3^2 + 2,19X_1X_2 + 9,31X_1X_3 + 31,31X_2X_3.$$

Зависимость плотности декоративных планок от параметров режима склеивания проиллюстрирована на рисунках 2, 3 и 4.

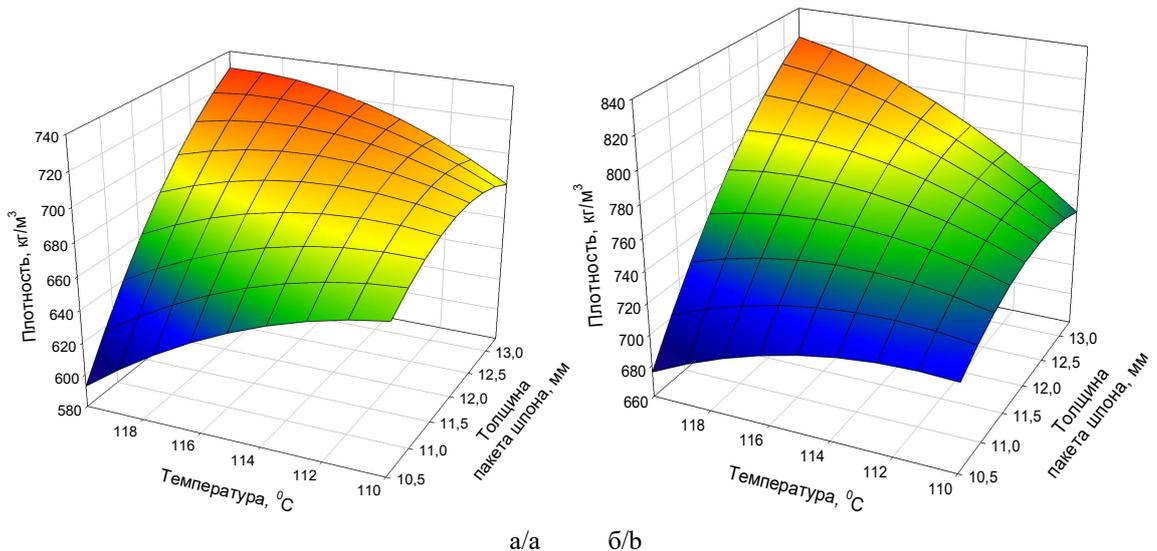
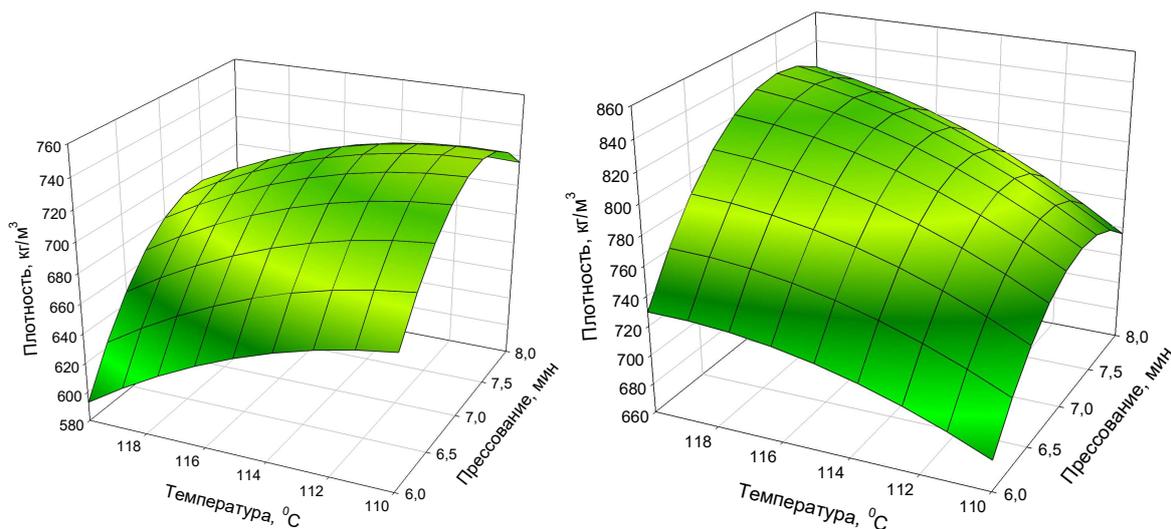


Рисунок 2. Поверхности отклика регрессионной модели зависимости плотности декоративных планок от варьируемых факторов при продолжительности прессования: а – 6 мин; б – 8 мин.

Figure 2. Response surfaces of the regression model of the dependence of the density of decorative strips on variable factors during pressing: a – 6 min; b – 8 min.

Источник: собственные результаты авторов /Source: authors' own scheme



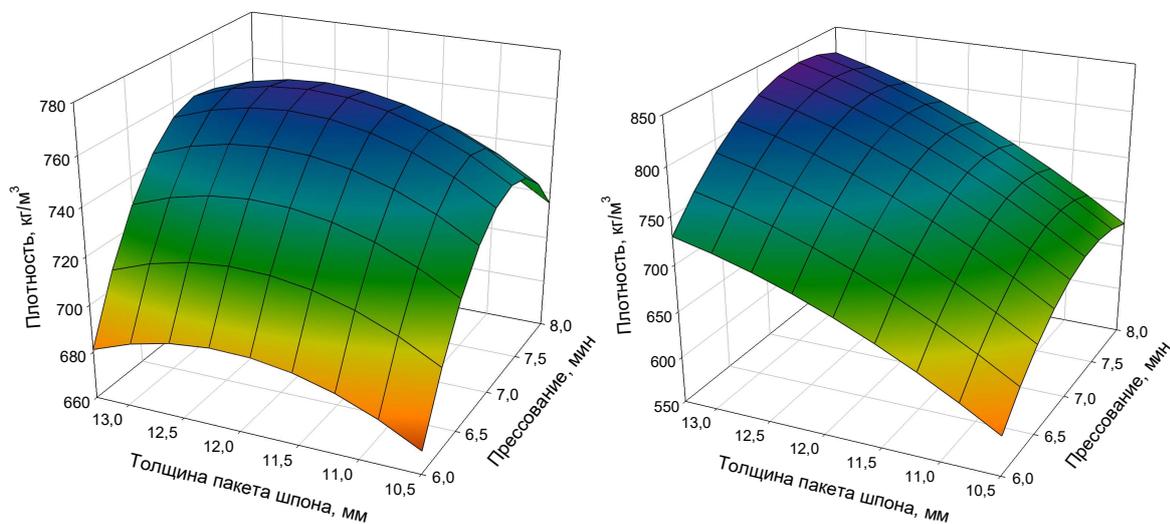
а б

Рисунок 3. Поверхности отклика регрессионной модели зависимости плотности декоративных планок при толщине пакета шпона: а – 10,5 мм; б – 13,3 мм.

Figure 3. Response surfaces of the regression model of the dependence of the density of decorative strips on the thickness of the veneer package: a – 10.5 mm; b – 13.3 mm.

Источник: собственные результаты авторов

Source: authors' own scheme



а/а б/б

Рисунок 4. Поверхности регрессионной модели зависимости плотности декоративных планок от температуры: а – 110 °С; б – 120 °С.

Figure 4. Surfaces of the regression model of the dependence of the density of decorative strips on temperature: а – 110 °С; б – 120 °С.

Источник: собственные результаты авторов

Source: authors' own scheme

Наибольшее влияние на плотность декоративных планок в исследуемом диапазоне оказывают влияние толщина пакета и температура прессования. С увеличением толщины пакета и температуры прессования плотность образцов декоративных планок возрастает. Из уравнения и номограмм (рисунки 2 - 4) следует, что максимальное значение плотности  $830 \text{ кг/м}^3$  в рамках варьируемых факторов достигается в точках, соответствующих параметрам режима склеивания: продолжительность склеивания - 8 мин, толщина пакета шпона - 13,5 мм, температура плит пресса  $120^\circ\text{C}$ .

Для изготовления декоративных планок данным способом может применяться технология и оборудование аналогичные производству LVL-бруса, которые приведены в исследованиях автора Э.А. Акшов (2021) [17] и авторов А. П. Малышкин и О. М. Максимова (2023) [18]. Как указывает автор А.И. Сабирова (2020) [19] в структуре себестоимости продукции основные затраты на приходится на сырье. Как указывают авторы А.А. Лукаш и др. (2022) [20], в деревообрабатывающей промышленности затраты на сырье составляют около 30% от общих затрат. Поэтому предложенный авторами способ изготовления композиционных отделочных материалов является экономически выгодным, т.к. стоимость  $1 \text{ м}^3$  сырья дуба - 70 000 руб., а стоимость  $1 \text{ м}^3$  сырья березы 5 000 руб.

### Выводы

1. Выявлено условие повышения доходности лесопромышленного комплекса путем увеличения объемов переработки древесины мягких лиственных пород и создания из нее продукции с улучшенными эксплуатационными свойствами.

2. Предложен импортно замещающий способ изготовления композиционных отделочных материалов, позволяющий для имитации текстуры дуба применять чередование лущеного шпона разных пород и цвета.

3. Проведено исследование зависимости плотности декоративных планок от параметров режима склеивания. Получено уравнение регрессии, адекватно описывающее зависимость плотности декоративных планок от условий склеивания: продолжительности прессования, толщины пакета шпона и температуры плит пресса. Установлена возможность получения декоративных планок повышенной плотности. Максимальное значение плотности -  $830 \text{ кг/м}^3$  достигается при продолжительности прессования 8 мин и толщине пакета шпона - 13,5 мм.

4. Показано, что изготовление композиционных отделочных материалов из древесины мягких лиственных пород является экономически выгодным, т.к. обеспечивает снижение сырьевых затрат при производстве продукции.

### Список литературы

1. Булгакова М. А. Формирование системы обеспечения экономической безопасности лесного комплекса России: специальность: 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством (экономическая безопасность): дис. ... д-ра экон. наук. – Санкт-Петербург, 2021. -356 с.

2. Распоряжение Правительства Российской Федерации «Об утверждении стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» от 11.02.2021 г. № 312-р. URL: <https://inlnk.ru/LAAVNO> (дата обращения: 12 сентября 2021).

3. Гагарин Ю. Н. Научный комментарий к стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года // Вопросы лесной науки. -2021. -Т. 4. - № 4. – Статья № 96. -DOI 10.31509/2658-607x-2021-44-96

4. Лукаш А.А. Процессы комплексной переработки древесины мягких лиственных пород в композиционные материалы строительного назначения с улучшенными эксплуатационными свойствами /А.А. Лукаш, Н.П. Лукуцова. -Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2021. -324 с.

5. Elesin M.A. The use of modified wood in the construction of wastewater treatment plants in coal mines of Kuzbass / M.A. Elesin, N.V. Karmanovskaya, N.A. Mashkin [et al.]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. 2021, 17(4):739-746. DOI: 10.1108/MMMS-09-2020-0213

6. Машкин Н.А. Применение модифицированной древесины в шахтной крепи / Н.А. Машкин, С.А. Громов, В.И. Шкраба //Эффективные методологии и технологии управления качеством строительных материалов. - Новосибирск, 2021.- С. 99-102.
7. Козорез И.Ф. Применение модифицированной древесины в малоэтажном домостроении / И.Ф. Козорез, В.И. Шкраба, Е.А. Калугина [и др.] // Наука Промышленность Оборона: Труды XXI Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 75-летию победы в Великой Отечественной войне / Под ред. С.Д. Саленко. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2020. - Т. 3. - С. 151-154.
8. Kuznetsova I.N. The technology for concrete production using an activated mixture of wood procession waste and sand. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021,1093:012018. DOI:10.1088/1757-899X/1093/1/012018.
9. Кузнецова И.Н. Технология и свойства модифицированной древесины для малоэтажного строительства / И.Н. Кузнецова, С.А. Громов // Вестник Югорского государственного университета. - 2023. - № 1(68). - С. 104-110. - DOI: 10.18822/byusu202301104-110
10. Жужукин К. В. Разработка комплексного пропитывающего состава для повышения эксплуатационных показателей древесины: специальность 4.3.4 «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины»: автореф. дис... канд. техн. наук / Жужукин Константин Викторович; Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова. - Воронеж, 2023. – 15 с.
- 11.Чернышев О. Н. Импортозамещение: закономерности формирования поверхностного рельефа мебельных щитов с использованием отечественного прессового оборудования/ О.Н. Чернышев, А.А. Лукаш, С.Н. Швачко, К.В. Разрезов //Леса России и хозяйство в них. -2024. - № 1 (88). - С. 193-200. - DOI: 10.51318/FRET.2023.88.1.020
12. Чернышев Д. О., Моделирование процесса формирования рифленых поверхностей мебельных фасадов/ Д.О. Чернышев, А.А. Лукаш, А.А. Пыкин, С.Н. Швачко, К.В. Разрезов // Леса России и хозяйство в них. - 2024. - № 2 (88). - С. 157-162. DOI: 10.51318/FRET.2024.89.2.017.
13. Тарбеева Н.А. Экспериментальное исследование комбинированного процесса изготовления облицовочных изделий на основе пьезотермической обработки деревянных заготовок / Н.А. Тарбеева, О.А. Рублева, А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина // Системы. Методы. Технологии. – 2021. – № 1 (49). – С. 90–97. DOI:10.18324/2077-5415-2021-1-90-97
14. Вараксин В. В. Использование реструктурированного шпона (файн-лайн) для облицовывания щитов / В. В. Вараксин; рук. Н. А. Кошелева // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. XIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, и конкурса по программе «Умник» / М-во образования и науки РФ, Урал. гос. лесотехн. ун-т, Урал. отделение секции наук о лесе Рос. Акад. естеств. наук, Урал. лесной технопарк. – Екатеринбург, 2017. – С. 60–62.
15. Патент № а 20080589. Способ изготовления декоративных пластин из лущеного шпона мягких лиственных пород древесины. заявл. 2008.05.08; опубл. 2009.12.30 / Л.В. Игнатович, А.В. Шишов, С.А. Осоко, М. М. Мещерякова; заявитель и патентообладатель Белорусский государственный технологический университет. – 4 с.
16. Чернышев О.Н. Научные исследования технологических процессов в деревообработке: учебное пособие / О.Н. Чернышев, А.А. Лукаш, С.В. Щепочкин. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2024. - 118 с.
17. Акшов Э.А. Технологические особенности клееных деревянных конструкций // Architecture and Modern Information Technologies. – 2021. - № 1(54). - С. 156 - 164. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-156-164
18. Малышкин А.П. Отечественный опыт применения LVL-бруса в несущих конструкциях / А. П. Малышкин, О.М. Максимова //Вестник евразийской науки. - 2023. - Т. 15. - № 5. - URL: <https://esj.today/PDF/42SAVN523.pdf>
19. Сабирова А.И. Методы ценообразования в управленческом учете: учебное пособие. – М.: Русайнс, 2020. - 154 с.

20. Лукаш А.А. Экспресс-метод определения себестоимости продукции при расчете технико-экономических показателей деревообрабатывающих цехов / А.А. Лукаш, Т.И. Глотова, Н.П. Малышева, Н.П. Путрова, О.Н. Чернышев // *Деревообрабатывающая промышленность*. - 2022. -№ 1. С. 23-33.

## References

1. Bulgakova M.A. Formation of the system of economic security of the forest complex of Russia. Specialty: 08.00.05 «Economics and management of the national economy (economic security)»: dis. ... Doct.of Economic sciences. – Sankt-Peterburg, 2021. -356 p. (in Rus)
2. *Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii «Ob utverzhdenii strategii razvitiya lesnogo kompleksa Rossijskoj Federacii do 2030 goda» ot 11.02.2021 g. № 312-r.* [Order of the Government of the Russian Federation “On approval of the strategy of development of the forest complex of the Russian Federation until 2030” from 11.02.2021 № 312-r.] URL: <https://inlnk.ru/LAAVNO> (data obrashcheniya: 12 sentyabrya 2021) (in Rus).
3. Gagarin Yu. N. *Nauchnyj kommentarij k strategii razvitiya lesnogo kompleksa Rossijskoj Federacii do 2030 goda* [Scientific commentary to the strategy of development of the forest complex of the Russian Federation until 2030] // *Voprosy lesnoj nauki* = Questions of forest science. 2021;4 (4). Stat'ya № 96. (in Rus). DOI 10.31509/2658-607x-2021-44-96/
4. Lukash A.A., Lukutcova N.P. *Processy kompleksnoj pererabotki drevesiny myagkih listvennyh porod v kompozicionnye materialy stroitel'nogo naznacheniya s uluchshennymi ekspluatacionnymi svojstvami* [Processes of complex processing of soft hardwoods into composite materials of construction purpose with improved operational properties]. M., Berlin: Direkt-Media, 2021. 324 p. (in Rus)
5. Elesin M.A., Karmanovskaya N.V., Mashkin N.A. [et al.]. The use of modified wood in the construction of wastewater treatment plants in coal mines of Kuzbass. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2021, 17(4):739-746. DOI: 10.1108/MMMS-09-2020-0213
6. Mashkin N.A., Gromov S.A., Shkraba V.I. The use of modified wood in mine supports. *Effective methodologies and technologies for building materials quality management*. Novosibirsk, 2021: 99-102. (in Rus)
7. Kozorez I.F. Application of modified wood in low-rise house-building/ I.F. Kozorez, V.I. Shkrabah, E.A. Kalugina et.al. *Science, Industry, Defense: Proceedings of the XXI All-Russian Scientific and Technical Conference dedicated to the 75th anniversary of Victory in the Great Patriotic War* / Ed. by S.D. Salenko. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2020; 1 (3):151-154. (in Rus)
8. Kuznetsova I.N. The technology for concrete production using an activated mixture of wood process waste and sand. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 093:012018. (in Rus) DOI:10.1088/1757-899X/1093/1/012018.
9. Kuznecova I.N. Gromov S.A. *Tekhnologiya i svojstva modifitsirovannoj drevesiny dlya maloetazhnogo stroitel'stva* [Technology and properties of modified wood for low-rise construction]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta* = Yugra State University Bulletin. 2023; 1(68):104-110 (in Rus).
10. Zhuzhukin K.V. Development of an integrated impregnating compound to improve the performance of wood: Specialty 4.3.4 "Technologies, machinery and equipment for forestry and wood processing" synopsis. dis. ... Cand. PhD / PhD in Engineering sciences] Zhuzhukin Konstantin Viktorovich; Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov. Voronezh, 2023. 15 p. (in Rus.)
11. Chernyshev O.N. *Importozameshchenie: zakonomernosti formirovaniya poverhnostnogo rel'efa mebel'nyh shchitov s ispol'zovaniem otechestvennogo pressovogo oborudovaniya* [Import substitution: regularities of surface relief formation of furniture boards using domestic pressing equipment]/ O.N. Chernyshev, A.A. Lukash, S.N. Shvachko, K.V. Razrezov // *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih.* = Forests of Russia and economy in them». 2024;1(88): 193-200.- DOI: 10.51318/FRET.2023.88.1.020
12. Chernyshev D. O. *Modelirovanie processa formirovaniya riflennyh poverhnostej mebel'nyh fasadov* [Modeling of the process of formation of fluted surfaces of furniture facades]/ D.O. Chernyshev, A.A. Lukash, A.A. Pykin,

S.N. Shvachko, K.V. Razrezov // Lesa Rossii i hozyajstvo v nih. = Forests of Russia and management in them. - 2024. - № 2 (88). - S. 157-162. (in Rus) DOI: 10.51318/FRET.2024.89.2.017.

13. Tarbeeva N.A., Rubleva O.A., Gorohovskij A.G., Shishkina E.E. *Eksperimental'noe issledovanie kombinirovannogo processa izgotovleniya oblicovочных izdelij na osnove p'ezotermicheskoj obrabotki derevyannyh zagotovok* [Experimental study of the combined process of manufacturing of facing products on the basis of piezothermal treatment of wooden blanks]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* = Systems. Methods. Technologies. 2021; 1 (49): 90–97. (in Rus) DOI:10.18324/2077-5415-2021-1-90-97.

14. Varaksin V.V. Use of the restructured veneer (file-line) for board facing] / V. V. Varaksin; ruk. N. A. Koshcheva. Scientific creativity of youth – to the Russian forest complex: mater. XIII All-Russian Scientific and Technical conference of students and postgraduates and the Umnik program competition = Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Ural State Forestry Engineering University, Ural Branch of the Forest Sciences Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Acad. of Natural Sciences, Ural. forest technopark. Yekaterinburg, 2017:60–62. (in Rus)

15. Method of manufacturing decorative plates from husked veneer of soft hardwoods]. *Preudostratified raft*: № 20080589: appl. 2008.05.08; publ. 2009.12.30 / L.V. Ignatovich, A.V. Shishov, S.A. Osoko, M. M. Meshcheryakova; Applicant and patent: Belarusian State Technological University.4 p. (in Rus)

16. Scientific research of technological processes in woodworking: Monography / O.N. Chernyshev, A.A. Lukash, S.V. Shchepochkin. Ekaterinburg: USFEU, 2024, 118 p. (in Rus)

17. Akshov E.A. Tekhnologicheskie osobennosti kleenyyh derevyannyh konstrukcij [Technological features of glued wooden structures] // *Architecture and Modern Information Technologies.* 2021; 1(54): 156 - 164. DOI: 10.24412/1998-4839-2021-1-156-164

18. Malyshkin A.P. Otechestvennyj opyt primeneniya LVL-brusa v nesushchih konstrukciyah [Domestic experience of LVL-bar application in load-bearing structures] / A. P. Malyshkin, O.M. Maksimova // *Vestnik evrazijskoj nauki.* = Bulletin of Eurasian science. 2023; 15 (5)- URL: <https://esj.today/PDF/42SAVN523.pdf> (in Rus) (available at: 05.01.2025).

19. Sabirova A.I. Metody cenoobrazovaniya v upravlencheskom uchete: uchebnoe posobie [Pricing methods in management accounting: a textbook] / Sabirova A.I. M.: Rusains, 2020, 154 p. (in Rus)

20. Lukash A.A. Ekspress-metod opredeleniya sebestoimosti produkcii pri raschete tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelej derevoobrabatyvayushchih cekhov [Express method for determining the cost of production when calculating technical and economic indicators of woodworking shops] / A.A. Lukash, T.I. Glotova, N.P. Malysheva, N.P. Putrova, O.N. Chernyshev // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = Woodworking industry. 2022; 1 (1): 23-33. (in Rus)

### Сведения об авторах

✉ *Лукаш Александр Андреевич* – доктор технических наук, профессор кафедры Лесное дело и технология деревообработки, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет, проспект Ст. Димитрова, 3а, г. Брянск, Российская Федерация, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5675-6304>, e-mail: [mr.luckasch@yandex.ru](mailto:mr.luckasch@yandex.ru).

*Пыкин Алексей Алексеевич* - кандидат технических наук, доцент кафедры Производство строительных конструкций, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет, проспект Ст. Димитрова, 3а, г. Брянск, Российская Федерация, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1369-4884>, e-mail: [alexem87@yandex.ru](mailto:alexem87@yandex.ru).

*Романов Виктор Александрович* - кандидат технических наук, доцент кафедры Лесное дело и технология деревообработки, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет, проспект Ст. Димитрова, 3а, г. Брянск, Российская Федерация, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-1794-7956>, e-mail: [vromanov62@mail.ru](mailto:vromanov62@mail.ru).

*Максименко Дмитрий Максимович* – аспирант кафедры Лесное дело и технология деревообработки, ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет, проспект Ст. Димитрова, 3а,

г. Брянск, Российская Федерация, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-7342-5687>, e-mail: [ttazikofficial@mail.ru](mailto:ttazikofficial@mail.ru).

*Чернышев Олег Николаевич* - кандидат технических наук, доцент кафедры Механическая обработка древесины, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9396-1246>, e-mail: [olegch62@mail.ru](mailto:olegch62@mail.ru).

### Information about the authors

✉ *Alexander A. Lukash* - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Forestry and Woodworking Technology, FSBEI HE «Bryansk State Engineering and Technology University», St. Dimitrova Avenue, 3a, Bryansk, Russian Federation, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5675-6304>, e-mail: [mr.luckasch@yandex.ru](mailto:mr.luckasch@yandex.ru).

*Alexey A. Pykin* - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Production of Building Structures, FSBEI HE «Bryansk State Engineering and Technology University», St. Dimitrova Avenue, 3a, Bryansk, Russian Federation, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1369-4884>, e-mail: [alexem87@yandex.ru](mailto:alexem87@yandex.ru).

*Victor A. Romanov* - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Forestry and Woodworking Technology, FSBEI HE «Bryansk State Engineering and Technology University», St. Dimitrova Avenue, 3a, Bryansk, Russian Federation, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-1794-7956>, e-mail: [vromanov62@mail.ru](mailto:vromanov62@mail.ru).

*Dmitry M. Maksimenko* - postgraduate student of the Department of Forestry and Woodworking Technology, FSBEI HE «Bryansk State Engineering and Technology University», St. Dimitrova Avenue, 3a, Bryansk, Russian Federation, 241037, St. Dimitrova Avenue, 3a, Bryansk, Russian Federation, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-7342-5687>, e-mail: [ttazikofficial@mail.ru](mailto:ttazikofficial@mail.ru).

*Oleg N. Chernyshev* - associate professor, Department Mechanical Wood Processing Department, FSBEI HE «Ural State Forest Engineering University», Sibirsky trakt str., 37, Ekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9396-1246>, e-mail: [olegch62@mail.ru](mailto:olegch62@mail.ru).

✉ Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/7>

УДК 630:631.3.072.31



## Результаты имитационного моделирования рекуперации энергии навесным механизмом трактора с приспособлением для агрегатирования его с лесными дисковыми орудиями

**Валерий И. Посметьев**, [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

**Максим А. Савинков**, [savinkov99max03@mail.ru](mailto:savinkov99max03@mail.ru) <https://orcid.org/0009-0004-6331-8136>

**Виктор В. Посметьев**, [victorvpo@mail.ru](mailto:victorvpo@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

**Вадим О. Никонов** , [8888nike8888@mail.ru](mailto:8888nike8888@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

**Владимир А. Зеликов**, [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

**Евгений В. Поздняков**, [pozd.ev@yandex.ru](mailto:pozd.ev@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>

*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

Решение проблемы повышения топливной экономичности и надежности лесных почвообрабатывающих агрегатов при выполнении операций обработки почвы при лесовосстановлении на вырубках, является актуальной задачей лесного хозяйства. Обоснован перспективный путь повышения эффективности лесных почвообрабатывающих орудий, заключающийся в более широком использовании в их конструкциях совершенных рекуперативных систем. Предложена перспективная конструкция рекуперативной навесной системы, позволяющая сократить расход топлива трактором, снизить динамические нагрузки, воспринимаемые навесным устройством с дисковыми орудиями, а также повысить производительность и качество обрабатываемой почвы трактором. Целью исследования, является оценка на основе имитационного моделирования показателей эффективности рекуперативной навесной системы трактора при изменении высоты препятствий, частоты встречи с препятствиями, а также скорости движения агрегата. Установлено, что при уменьшении с 10 до 2,5 м дистанции между препятствиями высотой 0,1 м рекуперированная мощность возрастает с 1,91 до 13,3 кВт. Выявлено, что при увеличении скорости с 0,3 до 1 м/с – рекуперированная мощность повышается с 1,4 до 11 кВт. С увеличением высоты неровностей от 0,3 до 1 м – рекуперированная мощность увеличивается по линейному закону с 0,38 до 2,75 кВт. В широком диапазоне скоростей движения трактора с орудием в транспортном положении рекуперативная навесная система обеспечивает достаточно эффективную рекуперированную мощность: от 0,4 до 4,9 кВт при движении со скоростями от 0,3 до 1,2 м/с. Результаты исследования показывают, что рекуперативная навесная система обеспечивает снижение затрат труда и расхода топлива агрегируемого трактора на 30 %. Полученные результаты могут быть применены в процессе проектирования аналогичных рекуперативных навесных систем трактора.

**Ключевые слова:** рекуперация энергии, навесная система, математическая модель, препятствие, почва, трактор, компьютерная программа, неровности, пневмогидроаккумулятор, имитационное моделирование, рабочая жидкость, дисковое орудие

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Результаты имитационного моделирования рекуперации энергии навесным механизмом трактора с приспособлением для агрегатирования его с лесными дисковыми орудиями / В. И. Посметьев, В. В. Посметьев, М. А. Савинков, В. О. Никонов, В. А. Зеликов, Е. В. Поздняков // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 104-122. – Библиогр.: с. 118-121 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/7>.

Поступила 15.11.2024. Пересмотрена 22.02.2025. Принята 01.03.2025. Опубликовано онлайн 24.03.2025.

Article

## Results of simulation modeling of energy recovery by a tractor mounted mechanism with a device for aggregating it with forest disk implements

Valerii I. Posmetev, posmetyev@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Maksim A. Savinkov, savinkov99max03@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0004-6331-8136>

Viktor V. Posmetev, victorvpo@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Vadim O. Nikonov  8888nike8888@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Vladimir A. Zelikov, zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Evgeny V. Pozdnyakov, pozd.ev@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

### Abstract

The solution to the problem of increasing the fuel efficiency and reliability of forest tillage units when performing soil processing operations during reforestation in clearings is an urgent task of forestry. A promising way to increase the efficiency of forest tillage implements is substantiated, consisting in a wider use of advanced recuperative systems in their designs. A promising design of a recuperative mounted system is proposed, which allows reducing fuel consumption by the tractor, reducing dynamic loads perceived by the mounted device with disk tools, and increasing the productivity and quality of the soil processed by the tractor. The purpose of the study is to evaluate, based on simulation modeling, the efficiency indicators of the recuperative mounted system of the tractor when changing the height of obstacles, the frequency of encounters with obstacles, and the speed of the unit. It was found that when the distance between obstacles with a height of 0.1 m is reduced from 10 to 2.5 m, the recuperated power increases from 1.91 to 13.3 kW. It was found that with an increase in speed from 0.3 to 1 m/s, the recuperated power increases from 1.4 to 11 kW. With an increase in the height of unevenness from 0.3 to 1 m, the recuperated power increases linearly from 0.38 to 2.75 kW. In a wide range of tractor speeds with an implement in the transport position, the recuperative mounted system provides a fairly effective recuperated power: from 0.4 to 4.9 kW when moving at speeds from 0.3 to 1.2 m/s. The results of the study show that the recuperative mounted system provides a 30% reduction in labor costs and fuel consumption of the aggregated tractor. The results can be applied in the design of similar recuperative mounted systems of the tractor.

**Keywords:** *energy recovery, mounted system, mathematical model, obstacle, soil, tractor, computer program, unevenness, pneumatic-hydraulic accumulator, simulation modeling, working fluid, disk implement*

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** author(s) thank(s) the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Posmetev V. I., Posmetev V. V., Savinkov M. A., Nikonov V. O., Zelikov V. A., Pozdnyakov E. V. (2024) Results of simulation modeling of energy recovery by a tractor mounted mechanism with a device for aggregating it with forest disk implements. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, № 1 (57), pp. 104-122 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/7>.

Received 15.11.2024. Revised 22.02.2025. Accepted 01.03.2025. Published online 24.03.2025.

## Введение

В процессе работы на нераскорчеванных вырубках, гарях и других неудобиях наиболее энергозатратными процессами, являются первичная подготовка почвы и многократные уходы за лесными культурами. Это связано с тем, что лесокультурные площади насыщены трудно перерезаемыми корнями, пнями, валунами, порубочными остатками, растительными включениями, выходами скальных пород, валяжником, кустарниками. Кроме этого, почва сильно задернелая, а в процессе передвижения лесных почвообрабатывающих агрегатов неизбежны наезды на препятствия [1-3].

Такие условия работы лесных почвообрабатывающих агрегатов приводят к: воздействию на них значительных вынужденных колебаний в широком частотно-амплитудном диапазоне; увеличению расхода топлива; ухудшению условий труда водителя; снижению производительности; низкому качеству обработки почвы; большим энергозатратам на движение лесных почвообрабатывающих агрегатов из-за криволинейности траектории и неровностей поверхностей лесных объектов, а также дополнительных сопротивлений, связанных с преодолением рабочими органами орудий неперерезаемых препятствий. Дополнительно к этому, рабочие органы почвообрабатывающих орудий в этих условиях неизбежно подвергаются интенсивным ударным нагрузкам из-за частых столкновений с препятствиями. Это приводит к ухудшению их надежности и долговечности. Давление рабочей жидкости в гидроцилиндре при транспортировании орудия в навешенном состоянии превышает рабочее в 1,5-2,5 раза. Такая жесткая система способствует развитию усталостных напряжений в деталях и узлах лесных почвообрабатывающих агрегатов, которые ведут к интенсивному износу и поломкам звеньев механизма навески трактора [4-6].

По различным оценкам исследователей расход топлива двигателями агрегируемых тракторов с лесными почвообрабатывающими орудиями выше на 15-20 %, чем при их работе на лесных объектах с более благоприятными условиями. Установлено также, что значительные непроизводительные затраты энергии, расходуются при колебаниях силового гидроцилиндра навесного механизма трактора в процессе транспортирования массивных дисковых орудий от

мест базирования к месту работы и обратно, а также разворотах трактора без выполнения технологических операций, подъема и опускания навесного орудия. Также, значительные потери энергии возникают при перепадах давления и нагреве рабочей жидкости в гидроприводе навесного механизма при обработке почвы орудием [7, 8].

В этой связи, решение проблемы повышения топливной экономичности и надежности при выполнении операций обработки почвы лесными почвообрабатывающими агрегатами, является актуальным и своевременным. В настоящее время российскими и зарубежными учеными ведется активная работа по повышению эффективности функционирования тракторов, агрегируемых с навесными почвообрабатывающими орудиями [9-23].

Abbaspour-Giandeh Y. и др. (2020) [9] в своем исследовании изучили влияние изменения тягового усилия культиватора при увеличении глубины обработки почвы, ее влажности, а также скорости движения трактора. Установлено, что с увеличением скорости движения трактора и повышением глубины обработки почвы возрастает тяговое усилие трактора, и ухудшается качество обработки почвы. При увеличении влажности почвы, значение тягового усилия снижается.

В статье Zhou M. и др. (2022) [10] рассмотрена проблема нестабильной глубины обработки почвы культиватором трактора по причине неровностей обрабатываемой поверхности. Процесс управления глубиной обработки почвы с помощью традиционной механической и гидравлической системы сложен. Применение бортового компьютера, контролирующего изменение углов поворота рычагов навесной системы, а также управляющего гидравлической системой изменения положения культиватора, позволяет за счет отслеживания в режиме реального времени геометрических параметров неровностей, имеющих на поверхности почвы, корректировать скорость и стабильность рабочей глубины обработки почвы, и, таким образом, повышать тяговую эффективность работы трактора.

Люо С. и др. (2022) [11] в своей работе предложили метод дистанционного мониторинга глубины обработки почвы. Для осуществления этого метода

использовался трехточечный механизм навески трактора с измерителем положения нижней стержневой тяги, который учитывал влияние корпуса трактора на глубину обработки почвы навесными орудиями, а также влияние рельефа опорной поверхности и значения ее уклона на изменение глубины обработки почвы. Система мониторинга, состоящая из многопозиционных датчиков и компонентов машинного зрения, также включает в себя устройство определения глубины обработки почвы, терминал мониторинга работы и удаленную систему обслуживания.

Sun X. и др. (2022) [12] в своей статье проанализировали тенденции развития электрогидравлической системы навески трактора, включающие в себя совершенствование конструкции навесной системы, улучшение методов регулировки и алгоритмов управления глубиной обработки почвы. Установлено, что снизить трудоемкость процесса, потребление энергии, улучшить комфортность водителя, а также повысить качество обрабатываемой почвы, можно путем использования многопараметрического метода регулировки глубины обработки почвы и внедрения интеллектуального алгоритма управления глубиной обработки почвы.

Liu C. и др. (2023) [13] в своей работе исследовали стратегии активного управления демпфированием между трактором и задними сцепками. Ими установлено, что традиционная гидравлическая система сцепки трактора имеет очень низкое демпфирование, что приводит к нестабильности системы при подъеме сцепки трактора, недостаточному запасу устойчивости трактора, а также значительным колебаниям давления рабочей жидкости в системе. В связи с этим, авторами предложен метод улучшения коэффициента демпфирования гидравлической сцепки трактора с обратной связью по давлению. Применение предлагаемого метода, обладающего высокой надежностью, позволяет снизить затраты на управление демпфированием гидравлической сцепки, повысить плавность движения трактора, безопасность и комфортность для водителя.

Luo Z. и др. (2023) [14] в своей работе предложили метод управления давлением рабочей жидкости в гидравлическом цилиндре электрогидравлической навесной системы электротрактора. Управление дав-

лением рабочей жидкости в гидроцилиндре электрогидравлической системы сцепки осуществлялось контроллером трактора. Он обеспечивал в режиме реального времени регулировку оптимального значения давления рабочей жидкости в гидроцилиндре, в зависимости от создаваемого сопротивления при различной глубине обработки почвы. Использование данного метода позволяет снизить пробуксовку колес на 9 %, увеличить эффективность тяги на 2,7 %, улучшить общую эффективность трактора на 3 % и снизить общие потери энергии электротрактора на 7,5 % при поддержании заданной глубины обработки почвы по сравнению с традиционным методом управления положением навесной системы.

Sun X. и др. (2023) [15] в своей статье с целью сокращения стоимости разработки электрогидравлических систем навески трактора предложили несколько конструкций стендов для исследования гидравлических навесных систем тракторов, позволяющих управлять нагрузкой для изменения глубины обработки почвы. Основными элементами стенда, являлись: стационарный компьютер; электрогидравлическая система управления навесной системой; система датчиков, обеспечивающая сбор, отображение и хранение данных в режиме реального времени.

Gao Y. и др. (2024) [16] в своей работе для улучшения качества обработки почвы выполнили исследование возникающих вибраций в процессе обработки почвы между трактором, трехточечным механизмом навески и роторным культиватором. Установлено, что с увеличением скорости движения агрегата и ухудшением качества почвы, характеристики вибраций, действующих на культиватор, навесной механизм и трактор возрастают. Для уменьшения сопротивления обработки роторным культиватором почвы требуется увеличить амплитуду его вибраций. Для снижения вибраций, действующих на трактор, необходимо оптимизировать скорость движения трактора с глубиной обработки почвы роторным культиватором.

Chukewad, Y. M. и др. (2024) [17] в своей статье представили трехточечную сцепку трактора, в которой нижние рычаги приводятся в действие двумя независимыми гидравлическими цилиндрами. Для синхронного перемещения двух нижних рычагов разработан

специализированный контроллер их положения. Установлено, что навешиваемое на трехточечную сцепку трактора орудие может следовать по рельефу, двигаясь вертикально, а также сохраняя нулевой крен вокруг продольной оси трактора.

Khaehanchanpong Y. и др. (2017) [18] в своем исследовании предложили для трактора культиватор, используемый в процессе междурядной обработки, рабочей шириной 80 см, скоростью вращения вала ротора 500 об./мин и общим весом 518 кг. Установлено, что скорость движения трактора не влияет на производительность такого культиватора. Скорость движения была ограничена для тракторов мощностью 25,3 и 37,3 кВт. Расход топлива у трактора мощностью 37,3 кВт был выше, чем у трактора мощностью 25,3 кВт.

Xu J. и др. (2021) [19] в своей статье с целью повышения качества работы и точности управления электрогидравлической системой навески трактора разработали алгоритм нечеткого управления, основанный на комбинированной регулировке силы и положения рабочего органа при изменении глубины обработки почвы. Результаты испытания показали, что предлагаемая система регулировки глубины обработки почвы с использованием разработанного алгоритма имеет высокую скорость реагирования, что повышает надежность работы агрегата и качество обработки почвы.

Kim Y-S. и др. (2020) [20] в своей работе выполнили исследование влияния глубины обработки почвы и выбора силовой передачи на изменение механической нагрузки и топливной экономичности трактора во время движения. Механическая нагрузка во время обработки почвы является показателем общей производительности и ключевым фактором при проектировании силовой передачи трактора. Установлено, что нагрузка на заднюю ось и расход топлива больше всего зависят от сочетания глубины обработки почвы и выбора силовой передачи. С увеличением глубины обработки почвы, нагрузки на двигатель трактора и расход топлива возрастают. Для обеспечения надежности и эффективности работы трактора, необходимо, чтобы информация о глубине обработки почвы и скорости движения соответствовала силовой передаче, используемой трактором при выполнении операции обработки почвы.

Md-Tahir H. и др. (2021) [21] в своей статье сравнили тяговые характеристики, расход топлива и производительность тракторов, оснащенных обычными колесами с шинами и жесткими колесами с грунтозацепами в процессе движения при обработке почвы. Оснащение трактора жесткими колесами с грунтозацепами в сравнении с трактором с обычными колесами, улучшает тяговые характеристики при аналогичном весе оборудования, увеличивает производительность, снижает расход топлива, обеспечивает более низкое сопротивление движению, увеличивает общую эффективность обработки почвы. Кроме этого, использование таких колес, помимо снижения расхода топлива позволяет избежать уплотнения почвы и ухудшения состояния окружающей среды.

Shrivastava P. и др. (2024) [22] в своем исследовании предложили визуальный интерфейс, позволяющий измерять в режиме реального времени, отображать и хранить следующие параметры производительности трактора с навесным орудием: параметры геопозиции, глубины обработки почвы, скорости движения, пробуксовки, расхода топлива, тяги, крутящего момента отбора мощности. Разработанная система состоит из: глобальной системы позиционирования, поворотного потенциометра, датчиков нагрузки, тензодатчиков, микроконтроллера для обработки данных, интеллектуального сенсорного экрана. Использование данной системы позволяет снизить потери мощности трактора, повысить эффективность его работы, снизить эксплуатационные затраты при выполнении обработки почвы.

Коо Y. M. и др. (2021) [23] в своей работе выполнили оценку тяговой мощности и потребления топлива трактором, оснащенным комбинированным навесным орудием. Использование такого орудия упрощает процесс обработки почвы, повышает производительность процесса, а также снижает эксплуатационные расходы. Выявлено, что расход топлива трактором возрастает при использовании комбинированного навесного орудия, однако удельный объемный расход топлива уменьшается по мере увеличения скорости вращения вала отбора мощности и скорости движения трактора в прямом направлении.

Анализ научных работ, приведенных выше, показал, что повысить эффективность тракторов, агрегируемых навесным технологическим оборудованием можно за счет использования: оптимального соотношения глубины обработки почвы и скорости движения трактора в зависимости от влажности почвы; интеллектуальных систем дистанционного мониторинга, отслеживающих в режиме реального времени параметры неровностей на поверхности обрабатываемой почвы, и принимающих на этой основе решения об изменении углов поворота рычагов навесной системы, корректирующих за счет управления гидравлической системой глубину обработки почвы; многопараметрического метода регулировки и интеллектуального алгоритма управления глубиной обработки почвы; активного управления демпфированием между трактором и гидравлическими задними сцепками; метода управления давлением рабочей жидкости в гидроцилиндре навесной системы трактора в зависимости от глубины обработки почвы; усовершенствованных конструкций трехточечных сцепок; трактора с жесткими колесами, оснащенными грунтозацепами; комбинированного навесного орудия.

Установлено, что традиционные гидросистемы лесных почвообрабатывающих агрегатов не предусматривают аккумуляцию и полезное использование безвозвратно теряемой энергии. В этой связи, одним из перспективных путей повышения эффективности лесных почвообрабатывающих машин, является более широкое использование в их конструкциях совершенных рекуперативных систем.

Многолетний опыт работы авторов в области разработки и исследования рекуперативных систем и устройств для транспортно-технологических и лесных машин, позволил разработать перспективную конструкцию рекуперативной навесной системы трактора (рис. 1). Использование такой навесной системы, позволяет: снизить расход топлива трактором за счет преобразования потенциальной энергии массы дискового орудия в энергию рабочей жидкости с последующим ее накоплением в пневмогидроаккумуляторе и полезном использовании в рабочем процессе; повысить производительность обработки почвы трактором; снизить динамические нагрузки, воспринимаемые навесным устройством и дисковыми орудиями; дистанционно изменять и удерживать рабочие органы дисковых орудий на заданной

глубине обработки почвы, и, тем самым, повысить качество ее обработки.

Целью работы, является оценка показателей эффективности рекуперативной навесной системы трактора при изменении высоты препятствий, частоты встречи с препятствиями, скорости движения агрегата.

Цель работы достигается за счет разработки математической модели и на ее основе компьютерной программы, описывающей движение трактора, взаимодействие дисковых рабочих органов орудия с почвой и рекуперацию энергии рабочей жидкости навесной системой при встрече дискового орудия с препятствиями.

## Материалы и методы

### *Предмет и объект исследования*

Объект исследования – процесс рекуперации энергии рекуперативной навесной системой трактора. Предмет исследования – закономерности влияния высоты неровностей, дистанции между препятствиями, скорости движения трактора и положения культиватора на показатели эффективности работы рекуперативной навесной системы трактора.

### *Дизайн эксперимента или сбор данных*

Колесный трактор при движении на лесном объекте совершает поступательное движение вдоль обрабатываемого рядка (рис. 2, а). При движении по неровностям, имеющимся на опорной поверхности почвы колесный трактор совершает наклоны в поперечном и продольном направлениях. Для оценки работы предлагаемой рекуперативной навесной системы трактора, а также исследования основных ее конструктивных параметров, оказывающих наибольшее влияние на рекуперативную мощность, генерируемой навесной системой трактора, применены методы математического моделирования. Для удобства выполнения расчетов в математической модели, описывающей сложное-пространственное движение трактора, оснащенного рекуперативной навесной системой, разработана компьютерная программа, позволяющая исследовать влияние конструктивных параметров навесной системы, характеристик опорной поверхности почвы и эксплуатационных параметров трактора на изменение рекуперированной навесной системой мощности. Для визуализации колесного трактора в компьютерной программе, реализующей математическую модель,

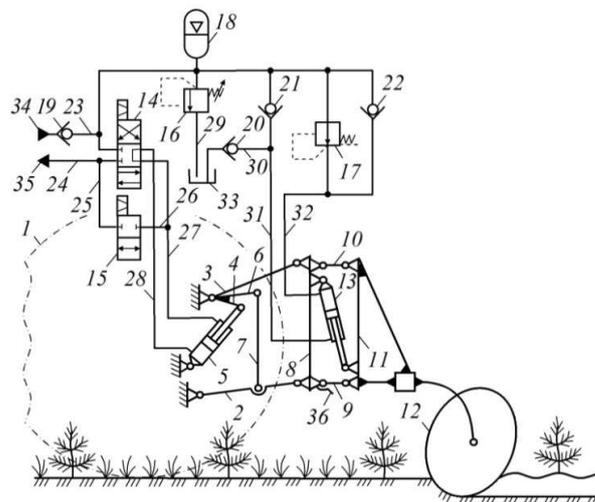


Рисунок 1. Рекуперативная навесная система трактора: 1 – трактор; 2, 3 – тяги; 4, 6, 9, 10 – рычаги; 5, 13 – гидроцилиндры; 7 – раскосы; 8 – треугольная ферма; 11 – рама; 12 – дисковые рабочие органы; 14, 15 – гидро-распределители; 16 и 17 – регулируемый предохранительный и редуцирующий клапаны; 18 – пневмогидравлический аккумулятор; 19-22 – обратные клапаны; 23-32 – трубопроводы; 33 – гидробак; 34, 35 – напорный и сливной порты

Figure 1. Recuperative mounted system of the tractor: 1 – tractor; 2, 3 – rods; 4, 6, 9, 10 – levers; 5, 13 – hydraulic cylinders; 7 – diagonals; 8 – triangular truss; 11 – frame; 12 – disk working bodies; 14, 15 – hydraulic distributors; 16 and 17 – adjustable safety and pressure-reducing valves; 18 – pneumohydraulic accumulator; 19-22 – check valves; 23-32 – pipelines; 33 – hydraulic tank; 34, 35 – pressure and drain ports

Источник: собственная схема авторов  
Source: authors' own schema

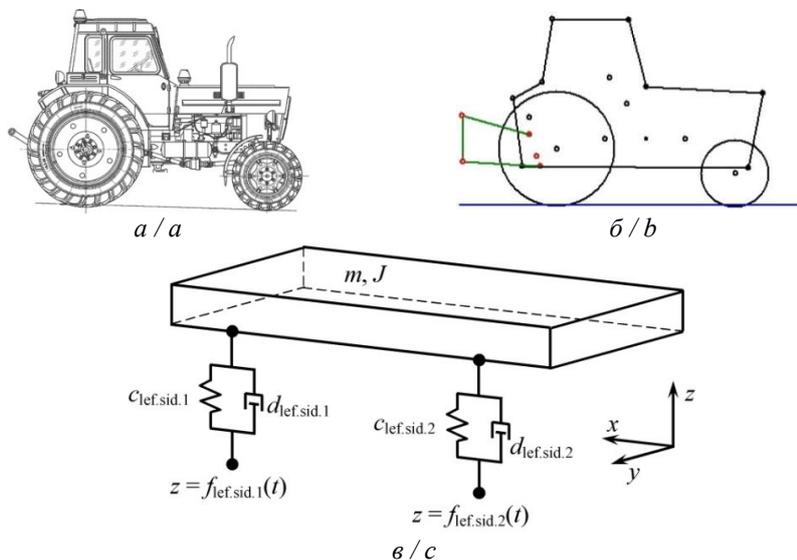


Рисунок 2. Общий вид трактора – а и его схемы при имитации в компьютерной программе – б и описании в математической модели – в

Figure 2. General view of the tractor – a and its diagrams when simulated in a computer program – b and described in a mathematical model – c

Источник: собственные схемы авторов  
Source: authors' own schemes

и для проверки корректности переноса геометрических параметров, колесный трактор представляется

схематично, как совокупность точек и отрезков (рис. 2, б). Математическая модель позволяет учитывать

работу рекуперативной навесной системы трактора, функционирование гидравлического привода такой системы, а также изменение параметров опорной поверхности обрабатываемой почвы. В математической модели, движущийся в трехмерном пространстве колесный трактор представлен твердым телом, на которое действуют силы в четырех точках со стороны моделируемой опорной поверхности почвы (рис. 2, в).

Колесный трактор обладает массой  $m$ , а также моментом инерции  $J$ , расчет которого осуществляется в каждый момент времени для текущей оси вращения. Положение колесного трактора в пространстве описывается в математической модели декартовыми координатами его центра тяжести  $(x, y, z)$ , а также углами отклонения  $(\phi_x, \phi_y, \phi_z)$  локальной системы координат относительно общей базовой системы координат. Движение колесного трактора, оснащенного рекуперативной навесной системой в математической модели, описывается системой дифференциальных уравнений, составленных на основе законов динамики, как вращательного, так и поступательного движения:

$$\left\{ \begin{aligned} m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} &= \sum_{i=1}^2 F_{\text{left},i}^x + \sum_{i=1}^2 F_{\text{right},i}^x; \\ m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= \sum_{i=1}^2 F_{\text{left},i}^y + \sum_{i=1}^2 F_{\text{right},i}^y; \\ m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} &= -m_k \cdot g + \sum_{i=1}^2 F_{\text{left},i}^z + \sum_{i=1}^2 F_{\text{right},i}^z; \\ J_x \frac{\partial^2 \phi_x}{\partial t^2} &= \sum_{i=1}^2 M^x(F_{\text{left},i}) + \sum_{i=1}^2 M^x(F_{\text{right},i}); \\ J_y \frac{\partial^2 \phi_y}{\partial t^2} &= \sum_{i=1}^2 M^y(F_{\text{left},i}) + \sum_{i=1}^2 M^y(F_{\text{right},i}); \\ J_z \frac{\partial^2 \phi_z}{\partial t^2} &= \sum_{i=1}^2 M^z(F_{\text{left},i}) + \sum_{i=1}^2 M^z(F_{\text{right},i}), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $F_{\text{left},i}$  и  $F_{\text{right},i}$  – силы, действующие на раму трактора;  $M^i$  – моменты сил  $F_{\text{left},i}$  и  $F_{\text{right},i}$  относительно оси  $i$ .

Для моделирования рекуперативной навесной системы трактора использовалась точечно-стержневая модель (рис. 3), которая составлена из совокупности точек, обладающих заданной массой и перемещающихся в пространстве по законам динамики. Точки  $P_1 \dots P_{16}$ , описывающие в математической модели рекуперативную навесную систему соединены между собой попарно тремя различными связями. Данные материальные точки связаны между собой шарнирно невесомыми стержнями

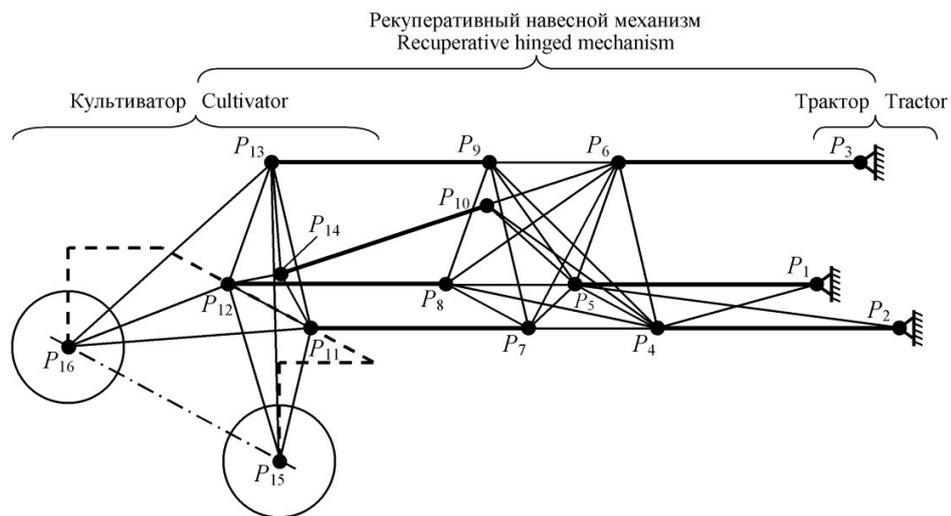


Рисунок 3. Точечно-стержневая модель рекуперативной навесной системы трактора  
Figure 3. Point-rod model of a tractor's recuperative mounted system

Источник: собственная схема авторов  
Source: authors' own schema

с заданными начальными длинами. Движение в пространстве рассматриваемых точек приводит к сжатию или растяжению связывающих их стержней. Это сопровождается тем, что невесомые стержни для кинематической связности моделируемой рекуперативной навесной системы и сохранения своих первоначальных размеров оказывают силовое воздействие на точки.

Траектории точек  $P_i$  в математической модели рассчитывают на основе следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_{P_i} \frac{d^2 x_{P_i}}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{mat.poin.}} F_{x_{P_i P_j}} + \begin{cases} F_{x_{dis.g.}}, & i=15, 16; \\ 0, & i \neq 15, 16; \end{cases} \\ m_{P_i} \frac{d^2 y_{P_i}}{dt^2} = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{mat.poin.}} F_{y_{P_i P_j}} + \begin{cases} F_{y_{dis.g.}}, & i=15, 16; \\ 0, & i \neq 15, 16; \end{cases} \\ m_{P_i} \frac{d^2 z_{P_i}}{dt^2} = -m_{P_i} g + \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{mat.poin.}} F_{z_{P_i P_j}} + \begin{cases} F_{z_{dis.g.}}, & i=15, 16; \\ 0, & i \neq 15, 16, \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

где  $m_{P_i}$  – масса точки  $P_i$ ;  $N_{mat.poin.}$  – количество задаваемых точек;  $F_{x_{dis.g.}}$ ,  $F_{y_{dis.g.}}$ ,  $F_{z_{dis.g.}}$  – декартовы составляющие силы со стороны опорной поверхности на дисковое орудие рекуперативной навесной системы трактора;  $g$  – ускорение свободного падения.

Зависимость, описывающая рельеф опорной поверхности почвы по которой движется трактор, оснащенный рекуперативной навесной системой, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} z_n(x) = & \sum_{i=1}^{N_h} (H_{hil.min} + F_{1i} (H_{hil.max} - H_{hil.min})) \cdot \\ & \cdot \exp \left( - \frac{(x - F_{2i} L_x)^2 + (y_n - F_{3i} L_y)^2}{2(\sigma_{hil.min} + F_{4i} (\sigma_{hil.max} - \sigma_{hil.min}))^2} \right) + \\ & + \sum_{j=1}^{N_j} (H_{obst.min} + F_{1j} (H_{obst.max} - H_{obst.min})) \cdot \\ & \cdot \exp \left( - \frac{(x - F_{2j} L_x)^2 + (y_n - F_{3j} L_y)^2}{2(\sigma_{obst.min} + F_{4j} (\sigma_{obst.max} - \sigma_{obst.min}))^2} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $H_{hil.max}$  и  $H_{hil.min}$  – максимальное и минимальное значения высот холмов;  $\sigma_{hil.max}$  и  $\sigma_{hil.min}$  – среднеквадратическое отклонение максимального и минимального значений высот холмов;  $H_{obst.max}$  и  $H_{obst.min}$  – максимальное и минимальное значения высот препятствий;  $\sigma_{obst.max}$  и  $\sigma_{obst.min}$  – среднеквадратическое отклонение максимального и минимального значений

высот препятствий;  $N_{obst.}$  и  $N_{hil.}$  – количество препятствий и холмов;  $F_{1i}$ , ...  $F_{4i}$  и  $F_{1j}$ , ...  $F_{4j}$  – последовательные реализации случайной величины  $F$ ;  $L_y$  и  $L_x$  – ширина и длина моделируемого участка опорной поверхности.

В процессе выполнения серий компьютерных экспериментов, колесный трактор, оснащенный рекуперативной навесной системой, движется с заданной скоростью относительно моделируемой опорной поверхности. На каждом шаге интегрирования осуществляется расчет координат  $x$ ,  $z$  центров дисков навесного оборудования, а также центров колес трактора. Силы, действующие на диск навесного оборудования трактора и колесо трактора, рассчитываются на основе упруго-вязкой модели почвы по следующим зависимостям (рис. 4):

$$\begin{aligned} F_x(x_{cir.}, y_{cir.}) &= \sum_{i=1}^{N_{num.dot.}} F_{ix} - \alpha v_a = \\ &= \sum_{i=1}^{N_{num.dot.}} c_{rig.} (R_k - r_i) \frac{x_{cir.} - x_i}{r_i} - \alpha v_a; \\ F_z(x_{cir.}, y_{cir.}) &= \sum_{i=1}^{N_{num.dot.}} F_{iz} - \alpha \frac{dz_0}{dt} = \\ &= \sum_{i=1}^{N_{num.dot.}} c_{rig.} (R_k - r_i) \frac{z_{cir.} - z_i}{r_i} - \alpha \frac{dz_0}{dt}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $(x_{cir.}, z_{cir.})$  – координаты центра, описываемого диска или колеса трактора;  $R_{cir.}$  – радиус диска или колеса трактора;  $N_{num.dot.}$  – количество точек поверхности моделируемой почвы, одновременно контактирующих с диском или колесом трактора;  $(x_i, z_i)$  – координаты  $i$ -й материальной точки;  $c_{rig.}$  – коэффициент жесткости взаимодействия диска или колеса трактора с поверхностью почвы;  $r_i$  – расстояние между стержнем и центром диска или колеса трактора.

Условие, характеризующее контакт  $i$ -й точки опорной поверхности почвы с диском или колесом трактора имеет следующий вид:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (z_i - z_k)^2} < R_{cir.} \quad (5)$$

Несколько серий экспериментов, проведенных в компьютерной программе заключались в исследовании изменения показателей эффективности рекуперативной навесной системы трактора при его

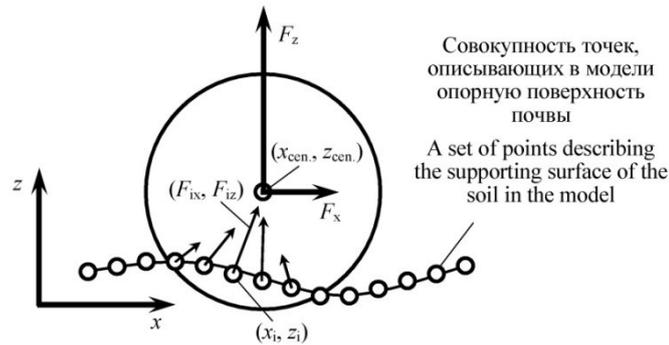


Рисунок 4. Схема сил, действующих на дисковое орудие трактора, оснащенного рекуперативной навесной системой трактора  
 Figure 4. Diagram of forces acting on a disk implement of a tractor equipped with a regenerative tractor mounted system

Источник: собственная схема авторов  
 Source: authors' own schema

прямолинейном движении по поверхности почвы с различным количеством пней и изменяемым расстоянием между ними (рис. 5). Функция, описывающая пень в форме трапеции, располагаемый на опорной поверхности почвы, при преодолении его левым бортом трактора, имеет следующий вид:

$$z_{lef.}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_{st}; \\ \frac{h_{st.}}{b_{st.}}(x - x_{st.}), & x_{st.} < x \leq x_{st.} + b_{st.}; \\ h_{st.}, & x_{st.} + b_{st.} < x \leq x_{st.} + b_{st.} + d_{st.}; \\ h_{st.} - \frac{h_{st.}}{b_{st.}}(x - (x_{st.} + b_{st.} + d_{st.})), & \\ x_{st.} + b_{st.} + d_{st.} < x \leq x_{st.} + 2b_{st.} + d_{st.}; \\ 0, & x > x_{st.} + 2b_{st.} + d_{st.}; \end{cases} \quad (6)$$

где  $h_{st.}$  – высота пня;  $d_{st.}$  – диаметр пня;  $x_{st.}$  – координата нижней части пня;  $b_{st.}$  – половина сбега пня.

Основным показателем, характеризующим эффективность рекуперативной навесной системы, является энергия  $E_p$ , запасаемая в пневмогидравлическом аккумуляторе:

$$E_p = \int_{t_1}^{t_2} P_{pn.}(t) Q_{pn.}(t) dt, \quad (7)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – начало и конец промежутка времени, за который оценивается накопление энергии;  $P_{pn.}$  – давление в пневмогидравлическом аккумуляторе;  $Q_{pn.}$  – скорость поступления (расход) рабочей жидкости в пневмогидравлический аккумулятор.

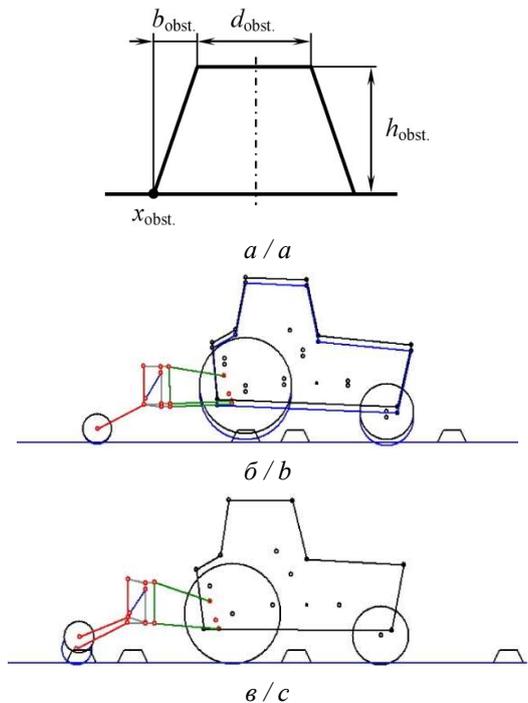


Рисунок 5. Схемы представления в математической модели препятствия в виде пня –  $a$ , моделируемого в компьютерной программе трактора, преодолеваемого колесами –  $b$  и дисковым орудием –  $в$  моделируемых препятствий

Figure 5. Schemes of representation in a mathematical model of an obstacle in the form of a stump –  $a$ , modeled in a computer program of a tractor, overcome by wheels –  $b$  and a disk tool –  $c$  in modeled obstacles

Источник: собственные схемы авторов  
 Source: authors' own schemes

Необходимо отметить, что один из наиболее целесообразных режимов использования рекуперативной навесной системы является циклическое использование при движении агрегата по обрабатываемым рядкам с накоплением энергии в пневмогидравлическом аккумуляторе и подъемом орудия для разворота в конце ряда с расходом энергии из пневмогидравлического аккумулятора. После того, как энергия пневмогидравлического аккумулятора частично или полностью израсходована, по мере движения агрегата рекуперированная энергия  $E_p$  сначала максимальна, затем постепенно снижается при последующих колебаниях в навесном механизме по мере заполнения рабочей жидкостью пневмогидравлического аккумулятора и повышения давления. При этом можно ожидать близкую к экспоненциальной зависимости от времени накопленной в пневмогидравлическом аккумуляторе энергии.

Также, важным показателем является средняя рекуперированная мощность, рассчитываемая при условии незаряженного пневмогидравлического аккумулятора:

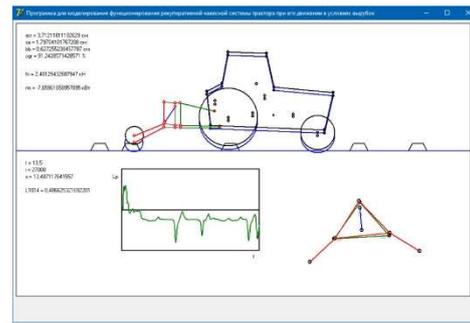
$$N_{reg.pov.} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P_{pn.0} \cdot Q_{pn.0}(t) dt, \quad (8)$$

где  $t_1 \dots t_2$  – интервал усреднения;  $P_{pn.0}$  – давление начала зарядки незаряженного пневмогидравлического аккумулятора;  $Q_{pn.0}$  – поступление (расход) рабочей жидкости в полость пневмогидравлического аккумулятора в предположении о постоянном (максимальном) объеме полости.

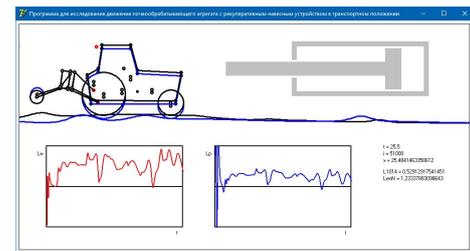
Разработаны две компьютерные программы для проведения компьютерных экспериментов по движению лесного почвообрабатывающего агрегата, оснащенного рекуперативной навесной системой трактора с обработкой почвы и преодолением препятствий, а также по движению с поднятым орудием по неровной опорной поверхности (рис. 6). Программы позволяют исследовать эффективность разработанной рекуперативной навесной системы трактора в различных режимах работы.

## Результаты

Разработанная модель позволила изучить два режима работы почвообрабатывающего агрегата, оснащенного рекуперативной навесной системой:



a / a



б / б

Рисунок 6. Интерфейсные формы компьютерных программ для исследования рекуперативной навесной системы трактора при его движении в условиях вырубок – а и при движении по неровностям трактора с поднятым в транспортное положение дисковым орудием – б

Figure 6. Interface forms of computer programs for studying the recuperative mounted system of a tractor during its movement in clearing conditions – а and during movement over uneven surfaces of a tractor with a disk tool raised to the transport position – б

Источник: собственные схемы авторов  
Source: authors' own schemes

обработка почвы с периодическим контактом с препятствиями (пнями, корнями или камнями). При этом рекуперация энергии контакта с препятствием и вертикального подъема орудия осуществляется с помощью гидроцилиндра орудия, а гидроцилиндр навесного механизма трактора удерживался заблокированным. Базовыми параметрами в этом случае были: высота препятствия 0,2 м, средняя дистанция между препятствиями 5 м, скорость движения агрегата 1 м/с; движение трактора по неровной опорной поверхности с поднятым орудием (в транспортном положении). При этом заблокирован гидроцилиндр орудия, и рекуперация энергии вертикальных колебаний орудия осуществляется с помощью гидроцилиндра навесного механизма трактора. Базовыми параметрами в этом случае были:

максимальная высота неровностей опорной поверхности 0,5 м, скорость движения трактора 1 м/с.

При обработке почвы на вырубках дисковым культиватором высота не перерезаемых препятствий  $h_{\text{obst}}$  оказывает существенную роль на траекторию движения дисковой батареи, контактирующей с препятствием, и дополнительное силовое воздействие на навесной механизм. Для изучения влияния высоты  $h_{\text{obst}}$  препятствий, имеющих на поверхности почвы на изменение рекуперированной мощности  $N_{\text{reg.pow.}}$  рекуперативной навесной системой трактора, выполнена серия экспериментов в компьютерной программе, при осуществлении которых высота  $h_{\text{obst}}$  препятствий последовательно с шагом 0,05 м увеличивалась в диапазоне от 0 до 0,4 м (рис. 7).

**Обсуждение**

Обнаружено, что с увеличением высоты препятствий рекуперированная мощность резко уве-

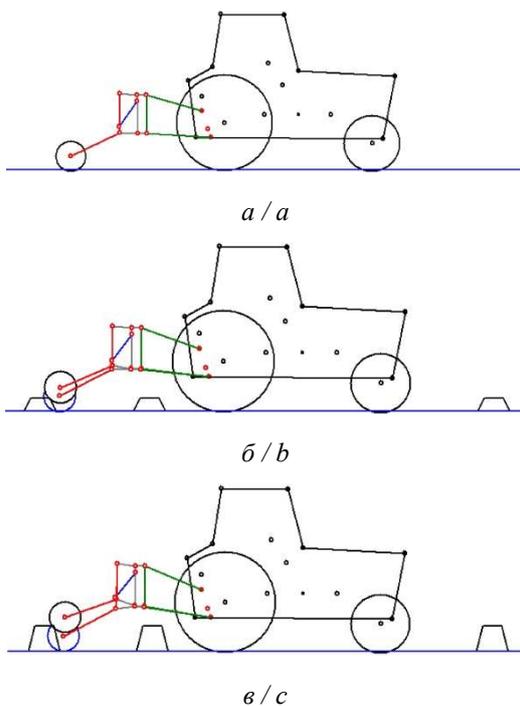


Рисунок 7. Результаты компьютерных экспериментов с препятствиями различной высоты  $h_{\text{obst}}$ :

$a - h_{\text{obst.}} = 0 \text{ м}; б - h_{\text{obst.}} = 0,2 \text{ м}; в - h_{\text{obst.}} = 0,4 \text{ м}$

Figure 7. Results of computer experiments with obstacles of different heights  $h_{\text{obst.}}$ :  $a - h_{\text{obst.}} = 0 \text{ m};$

$b - h_{\text{obst.}} = 0.2 \text{ m}; c - h_{\text{obst.}} = 0.4 \text{ m}$

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

личивается (по степенному закону с показателем степени около 3) (рис. 8). Если при высоте препятствия 0,1 м рекуперированная мощность составляет 0,83 кВт, то при высоте 0,15 м – уже 1,61 кВт, а при высоте 0,2 м – 6,8 кВт. Такая резкая зависимость связана с тем, что при увеличении высоты препятствия происходит изменение характера процесса рекуперации. При малых  $h_{\text{obst}}$  дисковая батарея только перекачивается через препятствие, что приводит к незначительному изменению хода штока гидроцилиндра орудия, и, соответственно, малой рекуперированной мощности. При больших же высотах  $h_{\text{obst}}$  дисковая батарея упирается в препятствие и поэтому необходима значительная сила, чтобы поднять батарею вверх по препятствию. При этом существенно изменяется ход штока гидроцилиндра орудия, и соответственно рекуперированная мощность оказывается значительно выше. Статистическая достоверность границ доверительного интервала для всех приведенных зависимостей на рисунках 8, 10, 11 и 13 достигала 0,95, а статистическая надежность границ интервала прогнозирования – 0,95.

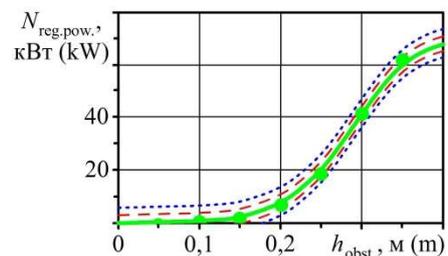


Рисунок 8. График влияния высоты  $h_{\text{obst}}$  преодолеваемого препятствия рекуперативной навесной системой трактора на рекуперированную устройством мощность  $N_{\text{reg.pow.}}$

Figure 8. Graph of the influence of the height  $h_{\text{obst.}}$  of the obstacle overcome by the regenerative mounted system of the tractor on the power

$N_{\text{reg.pow.}}$  recovered by the device

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

Можно ожидать, что рекуперированная мощность будет зависеть от частоты встреч орудия с препятствиями. Для исследования данной закономерности проведена серия компьютерных экспериментов, в которой варьировали среднюю дистанцию  $d_{\text{dist}}$  между препятствиями на уровнях 1, 1,25,

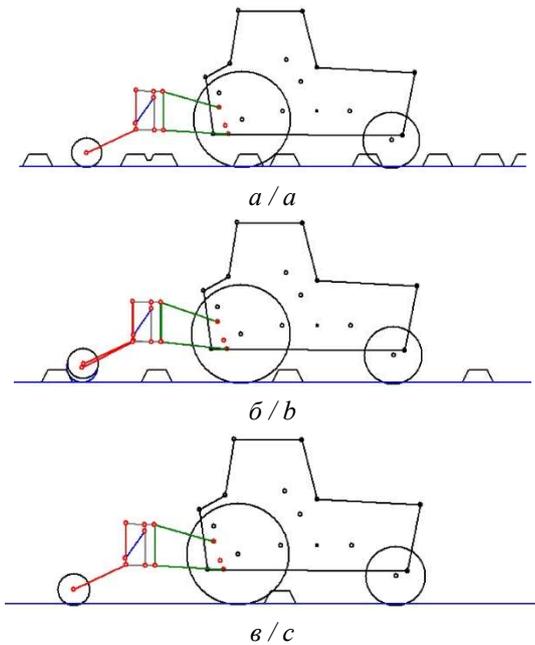


Рисунок 9. Результаты компьютерных

экспериментов с различной средней дистанцией между препятствиями  $d_{\text{dist.}}$ :  $a - d_{\text{dist.}} = 1$  м;

$\text{б} - d_{\text{dist.}} = 2,5$  м;  $\text{в} - d_{\text{dist.}} = 10$  м

Figure 9. Results of computer experiments with different average distances between obstacles  $d_{\text{dist.}}$ :

$a - d_{\text{dist.}} = 1$  m;  $b - d_{\text{dist.}} = 2.5$  m;  $c - d_{\text{dist.}} = 10$  m

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

2,5, 3,75, 5, 6,25, 7,5, 10 м (рис. 9).

Обнаружено, что рекуперированная мощность  $N_{\text{reg.pow.}}$  зависит от дистанции между препятствиями  $d_{\text{dist.}}$  по обратно-пропорциональному закону (рис. 10). В частности, при уменьшении дистанции  $d_{\text{dist.}}$  между препятствиями с 10 до 2,5 м рекуперированная мощность возрастает с 1,91 до 13,3 кВт.

Скорость движения трактора, оснащенного рекуперативной навесной системой, оказывает значительное влияние на частоту встречи дискового орудия с имеющимися на опорной поверхности почвы препятствиями. Для исследования влияния скорости  $v$  движения трактора, оснащенного рекуперативной навесной системой на изменение рекуперированной мощности  $N_{\text{reg.pow.}}$  выполнена серия экспериментов, при выполнении которых скорость трактора последовательно увеличивали с шагом 0,5 м/с в диапазоне от 0 до 3 м/с. Выявленная в результате компьютерных экспериментов зависимость в целом близка к линейной: при увеличении скорости

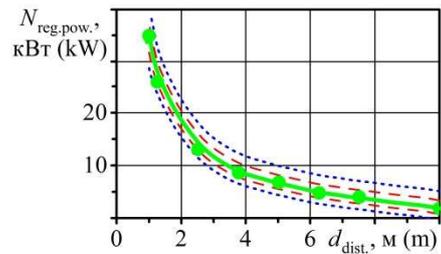


Рисунок 10. График влияния средней дистанции между препятствиями  $d_{\text{dist.}}$  при движении трактора на рекуперированную устройством мощность  $N_{\text{reg.pow.}}$ .

Figure 10. Graph of the influence of the average distance between obstacles  $d_{\text{dist.}}$  when the tractor is moving on the power  $N_{\text{reg.pow.}}$  recovered by the device

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

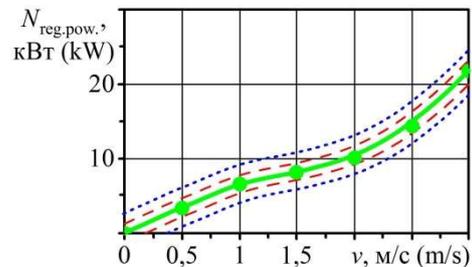


Рисунок 11. График влияния скорости  $v$  движения агрегата на рекуперированную устройством мощность  $N_{\text{reg.pow.}}$ .

Figure 11. Graph of the influence of the speed  $v$  of the unit on the power  $N_{\text{reg.pow.}}$  recovered by the device

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

с 0,5 до 3 м/с рекуперированная мощность  $N_{\text{reg.pow.}}$  повышается с 3,4 до 21,7 кВт (рис. 11).

При движении трактора с орудием в транспортном положении с увеличением высоты  $h_{\text{unev.}}$  неровностей опорной поверхности увеличиваются вертикальные колебания поднятого орудия, и, соответственно, можно ожидать увеличение рекуперированной мощности  $N_{\text{reg.pow.}}$  за счет уменьшения и сглаживания колебаний. Для исследования данных закономерностей выполнена серия экспериментов, в которых последовательно с шагом 0,1 м увеличивали высоту  $h_{\text{unev.}}$  неровностей в диапазоне от 0 до 1 (рис. 12). С увеличением высоты  $h_{\text{unev.}}$  неровностей

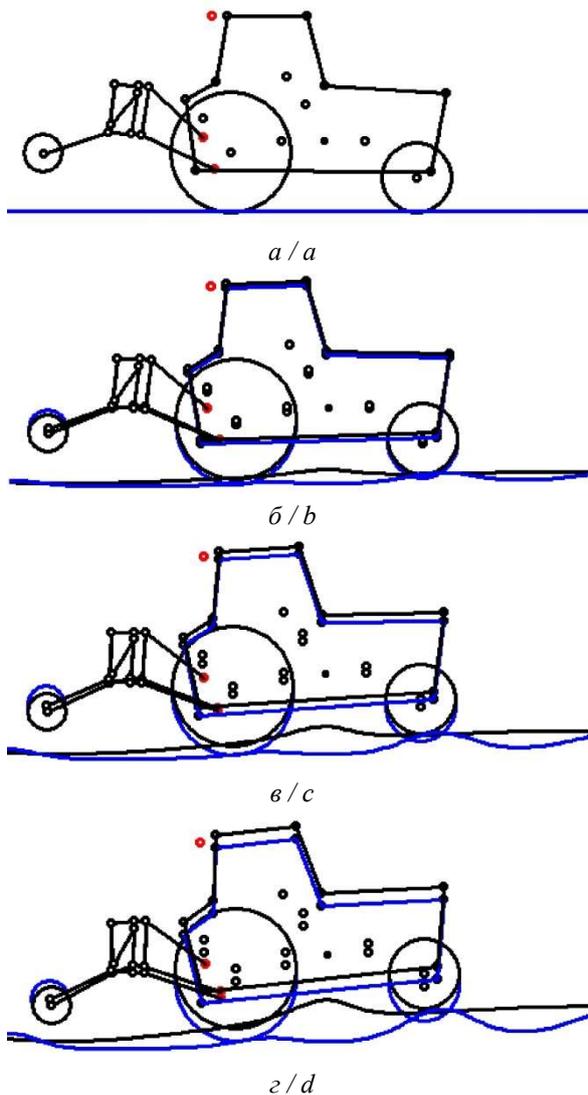


Рисунок 12. Результаты компьютерных экспериментов с различной высотой неровностей

$h_{\text{unev.}}$ :  $a - h_{\text{unev.}} = 0$  м;  $b - h_{\text{unev.}} = 0,2$  м;  
 $c - h_{\text{unev.}} = 0,4$  м;  $d - h_{\text{unev.}} = 0,6$  м

Figure 12. Results of computer experiments with different heights of irregularities

$h_{\text{unev.}}$ :  $a - h_{\text{unev.}} = 0$  м;  $b - h_{\text{unev.}} = 0.2$  м;  
 $c - h_{\text{unev.}} = 0.4$  м;  $d - h_{\text{unev.}} = 0.6$  м

Источник: собственные вычисления авторов  
 Source: authors' own calculations

от 0 до 0,3 м рекуперированная мощность  $N_{\text{reg.pow.}}$  возрастает по квадратичному закону с 0 до 0,38 кВт. Однако дальнейшее увеличение высоты  $h_{\text{unev.}}$  неровностей с 0,3 до 1 м происходит по линейному закону с 0,38 до 2,75 кВт (рис. 13, a).

Для оценки влияния скорости  $v$  движения трактора с поднятым орудием на эффективность рекуперации энергии рекуперативной навесной системой проведена серия из девяти компьютерных экспериментов, в которых варьировали скорость  $v$  на уровнях 0,25, 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,5, 2, 2,5, 3 м/с. С увеличением скорости трактора от 0,5 до 3 м/с рекуперированная мощность повышается с 0,4 до 4,9 кВт.

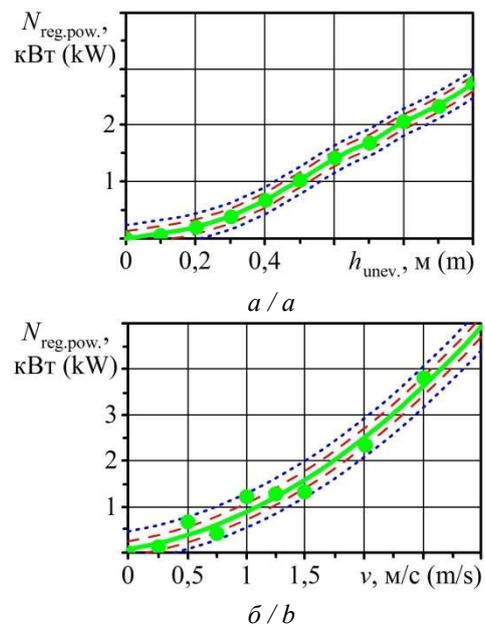


Рисунок 13. Графики влияния высоты неровностей  $h_{\text{unev.}}$  опорной поверхности –  $a$  и скорости  $v$  движения трактора с дисковым орудием в транспортном положении –  $b$  на рекуперированную устройством мощность  $N_{\text{reg.pow.}}$

Figure 13. Graphs of the influence of the height of unevenness  $h_{\text{unev.}}$  of the supporting surface –  $a$  and the speed  $v$  of movement of the tractor with a disk implement in the transport position –  $b$  on the power  $N_{\text{reg.pow.}}$  recovered by the device

Источник: собственные вычисления авторов  
 Source: authors' own calculations

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании аналогичных рекуперативных навесных систем различных по тяговому классу тракторов. Дальнейшее исследование будет направлено на экспериментальную проверку разработанной математической модели, которая позволит более точно определить влияние исследуемых факторов на изменение показателей эффективности раз-

рабочанной рекуперативной навесной системы трактора.

## Заключение

Анализ результатов исследования позволяет сделать заключение, что повысить эффективность тракторов, агрегируемых с навесными почвообрабатывающими орудиями можно за счет использования: оптимального соотношения глубины обработки почвы и скорости движения трактора в зависимости от влажности почвы; интеллектуальных систем дистанционного мониторинга, отслеживающих в режиме реального времени параметры неровностей на поверхности обрабатываемой почвы, и принимающих на этой основе решения об изменении углов поворота рычагов навесной системы, корректирующих за счет управления гидравлической системой глубину обработки почвы; многопараметрического метода регулировки и интеллектуального алгоритма управления глубиной обработки почвы; активного управления демпфированием между трактором и гидравлическим навесным механизмом; метода управления давлением рабочей жидкости в гидроцилиндре навесной системы трактора в зависимости от глубины обработки почвы; усовершенствованных конструкций трехточечных сцепок.

Предложена перспективная конструкция рекуперативной навесной системы трактора, использование которой позволяет: снизить расход топлива трактором за счет преобразования потенциальной энергии массы дискового орудия в энергию рабочей жидкости с последующим ее накоплением в пневмогидроаккумуляторе и

полезным использованием в рабочем процессе; повысить производительность обработки почвы; снизить динамические нагрузки, воспринимаемые навесным устройством и дисковыми орудиями; дистанционно изменять и удерживать дисковые орудия на заданной глубине обработки почвы, и, тем самым, повысить качество ее обработки.

Предлагаемая навесная система трактора обеспечивает эффективную рекуперацию энергии в широком диапазоне частоты встреч дискового орудия с препятствиями, скоростей обработки почвы и высот неровностей опорной поверхности. Навесная система позволяет рекуперировать мощность порядка 21,7 кВт при наибольшей исследуемой скорости движения трактора.

Использование предлагаемой навесной системы трактора позволяет существенно повысить эффективность работы почвообрабатывающего агрегата на вырубках. Результаты теоретического исследования показывают, что рекуперативная навесная система обеспечивает снижение затрат труда и расхода топлива агрегируемого трактора на 30 %. Полученные результаты могут быть применены в процессе проектирования аналогичных навесных систем трактора. Дальнейшее исследование будет связано с оптимизацией конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора, а также с обоснованием перспективных конструкций рекуперативных гидроприводов для поддресоренных масс колесных и гусеничных тракторов.

## Список литературы

1. Бартенев И. М., Драпалюк М. В. Совершенствование технологии лесовосстановления на вырубках с применением энергонасыщенных тракторов. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 5 (383). – С. 117-133. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-117-133>.
2. Мясищев Д. Г., Шостенко Д. Н., Серебренников А. В. Потребление топлива порталным лесохозяйственным трактором с учетом стохастических факторов. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 5 (377). – С. 145-154. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-145-154>.
3. Посметьев В. И., Никонов В. О., Савинков М. А., Снятков Е. В. Перспективы разработки рекуперативного навесного механизма трактора с приспособлением для агрегатирования его с лесными дисковыми орудиями. Проблемы эксплуатации и перспективы развития автомобильного транспорта : Материалы всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 05-06 октября 2023 года / Отв. редактор В. О. Никонов. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова, 2023. – С. 101-111. DOI: [https://doi.org/10.58168/OPPRTD\\_101-111](https://doi.org/10.58168/OPPRTD_101-111).
4. Посметьев В. И., Никонов В. О., Посметьев В. В., Зеликов В. А., Колодий П. В. Компьютерное

моделирование рекуперативного кривошипного механизма поворота колонны манипулятора лесовозного автопоезда. Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 2(50). – С. 158-178. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>.

5. Посметьев В. И., Никонов В. О., Посметьев В. В., Зеликов В. А., Попиков П. И., Колодий П. В., Михайлов А. А. Обоснование перспективной схемы кривошипного гидромотора для гидропривода опорно-поворотного устройства манипулятора лесовозного автопоезда. Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 3(51). – С. 180-199. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/13>.

6. Побединский В. В., Иовлев Г. А., Ляхов С. В., Голдина И. И. Нейро-нечеткая сеть для оценки остаточного ресурса тракторных двигателей. Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 120-130. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-120-130>.

7. Теринов Н. Н., Герц Э. Ф., Мехренцев А. В., Залесов С. В., Терехов Г. Г., Толкач О. В. Технологические схемы использования мини-тракторов на рубках ухода за лесом. Resources and Technology. – 2023. – Т. 20, № 4. – С. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2023.7263>.

8. Беляев А. Н., Тришина Т. В., Афоничев Д. Н. Анализ боковых реакций почвы на колесах трактора при повороте. Resources and Technology. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 44-56. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6363>.

9. Abbaspour-Gilandeh Y., Fazeli M., Roshanianfard A., Hernandez-Hernandez J. L., Penna A. F., Herrera-Miranda I. Effect of Different Working and Tool Parameters on Performance of Several Types of Cultivators. Agriculture 2020, 10, 145. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>.

10. Zhou M., Xia J., Zhang S., Hu M., Liu Z., Liu G. Development of a Depth Control System Based on Variable-Gain Single-Neuron PID for Rotary Burying of Stubbles. Agriculture 2022, 12, 30. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12010030>.

11. Luo C., Chen J., Guo S., An X., Xin Y., Wen C., Liu H., Meng Z., Zhao C. Development and Application of a Remote Monitoring System for Agricultural Machinery Operation in Conservation Tillage. Agriculture 2022, 12, 1460. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091460>.

12. Sun X., Lu Z., Song Y., Cheng Z., Jiang C., Qian J., Lu Y. Development Status and Research Progress of a Tractor Electro-Hydraulic Hitch System. Agriculture 2022, 12, 1547. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12101547>.

13. Liu C., Gu J., Du X., Yang L., Mao E. A Vibration Reduction control Method for Tractor Rear Hydraulic Hitch Based on Pressure Feedback. Agriculture 2023, 13, 1546. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081546>.

14. Luo Z., Wang J., Wu J., Zhang S., Chen Z., Xie B. Research on a Hydraulic Cylinder Pressure Control Method for Efficient Traction Operation in Electro-Hydraulic Hitch System of Electric Tractors. Agriculture 2023, 13, 1555. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081555>.

15. Sun X., Song Y., Wang Y., Qian J., Lu Z., Wang T. Design and Test of a Tractor Electro-Hydraulic-Suspension Tillage-Depth and Loading-Control System Test Bench. Agriculture 2023, 13, 1884. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13101884>.

16. Gao Y., Yang Y., Fu S., Feng K., Han X., Hu Y., Zhu Q., Wei X. Analysis of Vibration Characteristics of Tractor-Rotary Cultivator Combination Based on Time Domain and Frequency Domain. Agriculture 2024, 14, 1139. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071139>.

17. Chukewad Y. M., Chadha S., Jagdale K. S., Elkunchwar N., Rosa U. A. Tractor Three-Point Hitch Control for an Independent Lower Arms System. AgriEngineering 2024, 6, 1725-1746. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020100>.

18. Khaehanchanpong Y., Ahamed T., Takigawa T. Design, Fabrication and Performance Evaluation of an Inter-Row Cultivator for Sugarcane Fields. Inventions 2017, 2, 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions2030025>.

19. Xu J., Li R., Li Y., Zhang Y., Sun H., Ding X., Ma Y. Research on Variable-Universe Fuzzy Control Technology of an Electro-Hydraulic Hitch System. Processes 2021, 9, 1920. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9111920>.

20. Kim Y-S, Kim W-S., Baek S-Y., Baek S-M., Kim Y-J., Lee S-D., Kim Y-J. Analysis of Tillage Depth and Gear Selection for Mechanical Load and Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Using an Agricultural Field Measuring System. Sensors 2020, 20, 2450. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092450>.

21. Md-Tahir H., Zhang J., Xia J., Zhou Y., Zhou H., Du J., Sultan M., Mamona H. Experimental Investigation of Traction Power Transfer Indices of Farm-Tractors for Efficient Energy Utilization in Soil Tillage and Cultivation Operations. *Agronomy* 2021, 11, 168. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010168>.
22. Shrivastava P., Tewari V. K., Gupta C., Chouriya A. HMI-assisted visual interface-cum-embedded system for measurement of tractor-implement performance parameters. *J Field Robotics*. 2024 ; 41 : 2147-2168. DOI: <https://doi.org/0.1002/rob.22221>.
23. Koo Y. M., Kang Y. Characteristics of Power and Fuel Use of a Tractor Mounted Integrated Implement for Round Ridge Preparation. *Journal of Biosystems Engineering* (2021) 46 : 496-507. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00122-w>.

## References

1. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V. *Sovershenstvovanie tekhnologii lesovosstanovleniya na virubkakh primeneniem energonasichennih traktorov* [Improving the technology of reforestation in clearings using energy-intensive tractors]. *Lesnoy zhurnal = Russian forestry journal*. 2021. № 5(383). pp. 117-133. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-5-117-133>.
2. Myasishev D. G., Shostenko D. N., Serebrennikov A. V. *Potreblenie topliva portalnim lesohozyaistvennim traktorom s uchetom stohasticheskikh faktorov* [Fuel consumption of a portal forestry tractor taking into account stochastic factors]. *Lesnoy zhurnal = Russian forestry journal*. 2020. № 5(377). pp. 145-154. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-5-145-154>.
3. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Savinkov M. A., Snyatkov E. V. *Perspektivi razrabotki rekuperativnogo navesnogo mehanizma traktora s prisposobleniem dlya agregatirovaniya ego s lesnimi diskovimi orudiyami* [Prospects for the development of a recuperative tractor mounted mechanism with a device for its aggregation with forest disk tools]. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, October 5-6, 2023*. pp. 101-111. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.58168/OPPRTD\\_101-111](https://doi.org/10.58168/OPPRTD_101-111).
4. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Zelikov V. A., Kolodii P. V. *Obosnovanie perspektivnoi shemi krivoshipnogo gidromotora dlya gidroprivoda oporno-povorotnogo ustroystva manipulyatora lesovoynogo avtopoezda* [Computer modeling of a recuperative crank mechanism for turning a timber truck manipulator column]. *Forestry Engineering Journal*. 2023. Vol. 13, № 2(50). pp. 158-178. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>.
5. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Zelikov V. A., Popikov P. I., Kolodii P. V., Mihailov A. A. *Obosnovanie perspektivnoi shemi krivoshipnogo gidromotora dlya gidroprivoda oporno-povorotnogo ustroystva manipulyatora lesovoynogo avtopoezda* [Justification of a promising scheme of a crank hydraulic motor for a hydraulic drive of a support-slewing device of a timber road train manipulator]. *Forestry Engineering Journal*. 2023. Vol. 13, № 3(51). pp. 180-199. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/13>.
6. Pobedinskii V. V., Iovlev G. A., Lyahov S. V., Goldina I. I. *Neiro-nechetkaya set dlya ocenki ostatochnogo resursa traktornih dvigatelei* [Neuro-fuzzy network for assessing the residual life of tractor engines]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*. 2022. Vol. 26, № 2. pp. 120-130. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-120-130>.
7. Terinov N. N., Gerc E. F., Mehrencev A. V., Zalesov S. V., Terehov G. G., Tolkach O. V. *Tekhnologicheskie shemi ispolzovaniya mini traktorov na rubkah uhoda za lesom* [Technological schemes for using mini-tractors in forest thinning]. *Resources and Technology*. 2023. Vol. 20, № 4. pp. 1-27. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2023.7263>.
8. Belyaev A. N., Trishina T. V., Afonichev D. N. *Analiz bokovih reakcii pochvi na kolesah traktora pri povorote* [Analysis of lateral soil reactions on tractor wheels during turning]. *Resources and Technology*. 2022. Vol. 19, № 3. pp. 44-56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6363>.
9. Abbaspour-Gilandeh Y., Fazeli M., Roshanianfard A., Hernandez-Hernandez J. L., Penna A. F., Herrera-Miranda I. *Effect of Different Working and Tool Parameters on Performance of Several Types of Cultivators*. *Agriculture* 2020, 10, 145. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>.
10. Zhou M., Xia J., Zhang S., Hu M., Liu Z., Liu G. *Development of a Depth Control System Based on Variable-*

*Gain Single-Neuron PID for Rotary Burying of Stubbles.* Agriculture 2022, 12, 30. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12010030>.

11. Luo C., Chen J., Guo S., An X., Xin Y., Wen C., Liu H., Meng Z., Zhao C. *Development and Application of a Remote Monitoring System for Agricultural Machinery Operation in Conservation Tillage.* Agriculture 2022, 12, 1460. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091460>.

12. Sun X., Lu Z., Song Y., Cheng Z., Jiang C., Qian J., Lu Y. *Development Status and Research Progress of a Tractor Electro-Hydraulic Hitch System.* Agriculture 2022, 12, 1547. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12101547>.

13. Liu C., Gu J., Du X., Yang L., Mao E. *A Vibration Reduction control Method for Tractor Rear Hydraulic Hitch Based on Pressure Feedback.* Agriculture 2023, 13, 1546. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081546>.

14. Luo Z., Wang J., Wu J., Zhang S., Chen Z., Xie B. *Research on a Hydraulic Cylinder Pressure Control Method for Efficient Traction Operation in Electro-Hydraulic Hitch System of Electric Tractors.* Agriculture 2023, 13, 1555. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13081555>.

15. Sun X., Song Y., Wang Y., Qian J., Lu Z., Wang T. *Design and Test of a Tractor Electro-Hydraulic-Suspension Tillage-Depth and Loading-Control System Test Bench.* Agriculture 2023, 13, 1884. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13101884>.

16. Gao Y., Yang Y., Fu S., Feng K., Han X., Hu Y., Zhu Q., Wei X. *Analysis of Vibration Characteristics of Tractor-Rotary Cultivator Combination Based on Time Domain and Frequency Domain.* Agriculture 2024, 14, 1139. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071139>.

17. Chukewad Y. M., Chadha S., Jagdale K. S., Elkunchwar N., Rosa U. A. *Tractor Three-Point Hitch Control for an Independent Lower Arms System.* AgriEngineering 2024, 6, 1725-1746. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020100>.

18. Khaehanchanpong Y., Ahamed T., Takigawa T. *Design, Fabrication and Performance Evaluation of an Inter-Row Cultivator for Sugarcane Fields.* Inventions 2017, 2, 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions2030025>.

19. Xu J., Li R., Li Y., Zhang Y., Sun H., Ding X., Ma Y. *Research on Variable-Universe Fuzzy Control Technology of an Electro-Hydraulic Hitch System.* Processes 2021, 9, 1920. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9111920>.

20. Kim Y-S, Kim W-S., Baek S-Y., Baek S-M., Kim Y-J., Lee S-D., Kim Y-J. *Analysis of Tillage Depth and Gear Selection for Mechanical Load and Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Using an Agricultural Field Measuring System.* Sensors 2020, 20, 2450. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092450>.

21. Md-Tahir H., Zhang J., Xia J., Zhou Y., Zhou H., Du J., Sultan M., Mamona H. *Experimental Investigation of Traction Power Transfer Indices of Farm-Tractors for Efficient Energy Utilization in Soil Tillage and Cultivation Operations.* Agronomy 2021, 11, 168. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010168>.

22. Shrivastava P., Tewari V. K., Gupta C., Chouriya A. *HMI-assisted visual interface-cum-embedded system for measurement of tractor-implement performance parameters.* J Field Robotics. 2024 ; 41 : 2147-2168. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.22221>.

23. Koo Y. M., Kang Y. *Characteristics of Power and Fuel Use of a Tractor Mounted Integrated Implement for Round Ridge Preparation.* Journal of Biosystems Engineering (2021) 46 : 496-507. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00122-w>.

## Сведения об авторах

*Посметьев Валерий Иванович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru).

*Савинков Максим Александрович* – аспирант кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6331-8136>, e-mail: [savinkov99max03@mail.ru](mailto:savinkov99max03@mail.ru).

*Посметьев Виктор Валерьевич* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: [victorvpo@mail.ru](mailto:victorvpo@mail.ru).

✉ *Никонов Вадим Олегович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

*Зеликов Владимир Анатольевич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

*Поздняков Евгений Владиславович* – кандидат технических наук, научный сотрудник патентного сектора научно-исследовательского отдела, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>, e-mail: pozd.ev@yandex.ru.

## Information about the authors

*Valerii I. Posmetev* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozova, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

*Maksim A. Savinkov* – The Post-Graduate Student of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozova, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6331-8136>, e-mail: savinkov99max03@mail.ru.

*Viktor V. Posmetev* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozova, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

✉ *Vadim O. Nikonov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozova, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

*Vladimir A. Zelikov* – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

*Evgeny V. Pozdnyakov* – Candidate of Technical Sciences, Research Fellow of the Patent Sector of the Research Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>, e-mail: pozd.ev@yandex.ru.

✉ – Для контактов / Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/8>

УДК 630\*31



## Оценка эффективности организации транспортных потоков на перевозках древесины

Антон П. Соколов<sup>1</sup>✉, a\_sokolov@psu.karelia.ru  <https://orcid.org/0000-0002-0798-4634>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185910, Российская Федерация

Статья посвящается описанию процесса оценки эффективности организации транспортных потоков для разных вариантов размещения предприятия по производству гофрошпонных панелей с помощью специализированной имитационной модели, разработанной в Петрозаводском государственном университете. Панели данного типа изготавливаются из шпона мягколиственных пород древесины, объемы переработки которой в Республике Карелия в настоящее время незначительны, и местные лесозаготовители испытывают определенные трудности с ее сбытом. Решение поставленной задачи базируется на использовании имитационной модели транспортных потоков на перевозках древесины, реализованной в среде ПО AnyLogic. С помощью предложенной имитационной модели возможно получать точные оценки эксплуатационной скорости автомобилей-сортиментовозов на конкретном маршруте с учетом дорожных условий, ограничений скорости, а также с учетом изменения интенсивности потока транспортных средств на разных участках маршрута. Благодаря этому появляется возможность сравнения экономической эффективности различных вариантов организации транспортных потоков. Для сравнения были выбраны варианты размещения производства в г. Медвежьегорске и в п. Пряжа. В качестве источников ресурсов выступают семь южных лесничеств Республики Карелия. Полученные результаты позволяют заключить, что более выгодным следует считать размещение предприятия в п. Пряжа. В этом случае суммарные транспортные затраты оказываются меньше на 2%, что соответствует экономии 5,8 млн. рублей в год. При этом годовой пробег всех транспортных средств сокращается на 42 900 км, что составляет 3,5%, однако это не приводит к сокращению общего времени работы транспортных средств, т. к. средняя эксплуатационная скорость оказывается на 0,6% меньше, чем в случае размещения в Медвежьегорске. Средние удельные транспортные затраты при размещении завода в Пряже оказываются меньше на 24,1 руб/м<sup>3</sup>. Таким образом, сокращение пробега на 3,5% ведет к сокращению затрат только на 2%.

**Ключевые слова:** транспорт леса, поставки древесины, имитационное моделирование, интенсивность дорожного движения, транспортные затраты, автомобили-сортиментовозы

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Соколов А. П. Оценка эффективности организации транспортных потоков на перевозках древесины / А.П. Соколов // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 123-137. – Библиогр.: с. 134-137 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/8>.

**Поступила** 14.12.2024. **Пересмотрена** 14.02.2025. **Принята** 03.03.2025. **Опубликована онлайн** 24.03.2025.

## Article

### Estimation of the supply chains efficiency in wood transportation

Anton P. Sokolov<sup>1</sup>✉, a\_sokolov@psu.karelia.ru  <https://orcid.org/0000-0002-0798-4634>

<sup>1</sup>*Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Petrozavodsk State University», Lenin av., 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation*

#### Abstract

The article describes the process of efficiency estimation of different variants for locating an enterprise for the production of corrugated veneer panels using a specialized simulation model developed at Petrozavodsk State University. A corrugated veneer panel is a new type of panel-type building facing materials intended for interior decoration. Panels of this type are made of softwood veneer, the processing volumes of which in the Republic of Karelia are currently insignificant, and local loggers experience certain difficulties with its sale. The solution to the problem is based on the use of a simulation model of traffic flows in timber transport, implemented in the AnyLogic software environment. Using the proposed simulation model, it is possible to obtain accurate estimates of the operating speed of timber trucks on a specific route, taking into account road conditions, speed limits, and changes in the traffic intensity on different sections of the route. This makes it possible to compare the economic efficiency of different variants for traffic flows organizing. For comparison, the options of production placement in Medvezhyegorsk and Pryazha were selected. In this case, seven southern forestries of the Republic of Karelia act as sources of resources. The obtained results allow us to conclude that the placement of the enterprise for the production of corrugated veneer panels in Pryazha is more profitable. In this case, the total transport costs are 2% less, which corresponds to savings of 5.8 million rubles per year. In this case, the annual run of all trucks is reduced by 42,900 km, which is 3.5%, but this does not lead to a reduction in the total trucks operating time, since the average operating speed is 0.6% less than in the case of placement in Medvezhyegorsk. The average specific transport costs when placing the plant in Pryazha are 24.1 rubles/m<sup>3</sup> less. Thus, a 3.5% reduction in the run leads to a reduction in costs by only 2%.

**Keywords:** *supply chains; forest transport; wood procurement; simulation modeling; traffic intensity; transport costs; timber truck*

**Funding:** This work was supported by the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education (state research target, theme no. 075-03-2023-128).

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest.

**For citation:** Sokolov A.P. (2024). Estimation of the supply chains efficiency in wood transportation. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 123-137 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/8>.

**Received** 14.12.2024. **Revised** 14.02.2025. **Accepted** 03.03.2025. **Published online** 24.03.2025.

#### Введение

Изменения, происходящие в последние годы в экономике России, в том числе, обусловленные взятым курсом на широкое импортозамещение, развитие глубокой переработки природных ресурсов внутри страны, сокращением экспорта товаров с

низкой степенью переработки, санкционной политикой ряда западных стран и т. д. требуют выработки новых эффективных решений по использованию древесины в промышленных и потребительских целях [1]. Данная проблема особенно актуальна для приграничных районов, в течение длительного времени ориентировавшихся именно на экспорт

многих видов продукции. Отсутствие таких решений или их недостаточная эффективность станет причиной снижения объемов лесозаготовок и далее по цепочке, к необходимости уменьшения объемов переработки древесины и последующему сокращению занятости населения, что может привести к весьма негативным экономическим и социальным последствиям. Поэтому представляется актуальной разработка новых способов переработки временно невостребованных видов древесины и новых видов продукции их нее.

Новым перспективным материалом именно такого рода является гофрошпонная панель. Гофрошпонная панель – это новый вид строительных облицовочных материалов панельного типа, предназначенный для внутренней отделки помещений [2, 3]. Такие панели изготавливаются из шпона мягколиственных пород древесины, объемы переработки которой в Республике Карелия в настоящее время незначительны, и местные лесозаготовители испытывают определенные трудности с ее сбытом. Поэтому создание нового предприятия по производству гофрошпонных панелей с годовым объемом переработки около 240 000 м<sup>3</sup>, позволило бы в существенной мере увеличить эффективность функционирования лесного комплекса региона.

Важное значение имеет правильный выбор конкретного места размещения нового производства, в первую очередь с точки зрения бесперебойного снабжения предприятия сырьем при обеспечении приемлемого уровня затрат на транспортировку древесины. Это определяется тем, что по разным данным [4-7] транспортная составляющая в производственных затратах лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий может достигать 50-60%.

Данная статья посвящается описанию процесса оценки эффективности организации транспортных потоков для разных вариантов размещения предприятия по производству гофрошпонных панелей с помощью специализированной имитационной модели, разработанной в Петрозаводском государственном университете.

## Материалы и методы

Решение поставленной задачи базируется на использовании имитационной модели транспортных потоков на перевозках древесины, реализованной в среде ПО AnyLogic.

Имитационное моделирование широко используется при решении задач анализа и планирования цепей поставок [8-11]. В области лесозаготовительного производства этот метод тоже давно нашел свое успешное применение. При этом хорошо зарекомендовал себя метод агентного моделирования. Например, в работе [12] он используется для обоснования условий устойчивости лесохозяйственной деятельности. Также очень часто применяется дискретно-событийное моделирование. В работе [13] оно применяется для построения имитационной модели технологического заготовки древесины, в работе [14] – для моделирования технологического процесса вывозки древесины. Часто имитационное моделирование применяется для оценки параметров процессов взаимодействия лесных машин с лесной средой [15].

Разработанная имитационная модель основана на одновременном использовании агентного и дискретно-событийного моделирования и позволяет с большой точностью определять удельные транспортные затраты, которые вычисляются по формуле [16]:

$$C_T = \frac{C_{var} \cdot L}{\beta} + C_{fix} \cdot \left( \frac{L}{V} + t_l \right), \quad (1)$$

где  $C_T$  - удельные транспортные затраты, руб/м<sup>3</sup>;

$C_{var}$  - переменные затраты, руб/км;

$L$  - расстояние ездки, км;

$\beta$  - коэффициент использования пробега;

$C_{fix}$  - постоянные затраты, руб/ч;

$V$  - эксплуатационная скорость с учетом пере­рывов на отдых, км/ч;

$t_l$  - суммарное время погрузки и разгрузки, ч;

$q$  - грузоподъемность транспортного средства, м<sup>3</sup>.

При использовании одних и тех же транспортных средств, однотипном грузе и неизменном

подходе к организации перевозок, удельные транспортные затраты фактически будут зависеть только от реализующейся на маршруте эксплуатационной скорости  $V$ .

Для точного определения эксплуатационной скорости с учетом дорожных условий, ограничений скорости, а также с учетом изменения интенсивности потока транспортных средств на разных участках маршрута была разработана математическая модель, описанная в работе [17]. В соответствии с этой моделью эксплуатационная скорость на маршруте вычисляется по формуле:

$$V = \frac{L}{\sum_{i=0}^M \sum_{j=1}^{12} \frac{l_{ij}}{V_i^0 - \alpha_i \gamma_{ij} \cdot N_i^b} + t_i^{out}}, \quad (2)$$

где  $M$  - число участков маршрута с разными характеристиками;

$l_{ij}$  - расстояние, пройденное автомобилем по участку  $i$  внутри временного периода  $j$ , км;

$V_i^0$  - скорость движения по участку  $i$  одиночного автомобиля при отсутствии помех, км/ч;

$\alpha_i$  - коэффициент снижения скорости, который зависит от состава транспортного потока [18];

$\gamma_{ij}$  - доля среднесуточного числа транспортных средств, следующих через участок  $i$  в течение периода  $j$ ;

$N_i^b$  - среднесуточная интенсивность движения в одном направлении для участка  $i$ , сут<sup>-1</sup>;

$t_i^{out}$  - время остановок на отдых, пришедшихся на участок  $i$ , ч.

Как известно, интенсивность дорожного движения изменяется в течение суток. Это также подтверждается исследованиями, выполненными в отношении перевозок древесины [19]. В разработанной модели для учета изменения интенсивности движения, сутки были разбиты на двенадцать двухчасовых интервалов. Изменение интенсивности учитывается с помощью коэффициентов  $\gamma_{ij}$ . Значения коэффициентов для двухчасовых интервалов, на которые разбиваются сутки в описываемой модели были приняты в соответствии с исследованием [20].

Среднесуточная интенсивность движения по участкам дорог была определена с использованием интернет-ресурса государственной системы контроля за формированием и использованием средств

дорожных фондов (СКДФ). Сайт создан и поддерживается Федеральным дорожным агентством Росавтодор и содержит большой объем информации практически о всех дорогах Российской Федерации. В состав данных в том числе входят и постоянно обновляющиеся данные мониторинга интенсивности движения.

Схема альтернативных вариантов размещения предприятий и соответствующих им транспортных потоков показана на рис. 1.

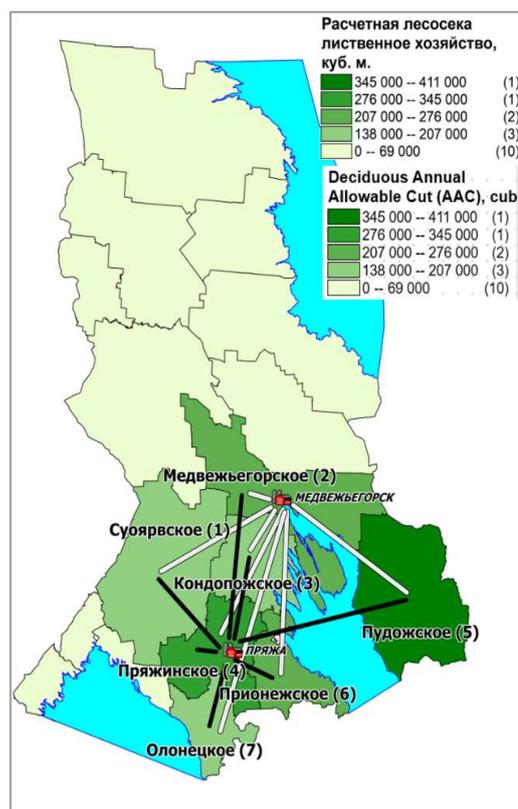


Рисунок 1. Альтернативные варианты размещения предприятия и транспортные потоки: (1)-(7) – коды лесничеств (см. табл. 1)

Figure 1. Enterprises allocation alternatives and traffic flows: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 1)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Как можно заметить (рис. 1) значительные запасы мягколиственной древесины сосредоточены в южной части Республики Карелия: в Пудожском, Суоярвском, Олонецком, Пряжинском, Прионеж-

ском, Кондопожском и Медвежьегорском лесничествах [21]. Поэтому предприятие по производству гофрошпонных панелей также целесообразно разместить в этой части республики. Производство должно располагаться в черте крупного населенного пункта или вблизи него, для достаточного обеспечения производства трудовыми ресурсами, удобства их доставки к месту работы, а также с точки зрения более простого подключения к коммунальным сетям. Для сравнения были выбраны варианты размещения производства в г. Медвежьегорске и в п. Пряжа. В качестве источников ресурсов в данном случае выступают семь южных лесничеств, вклад каждого из которых в снабжение предприятия был принят пропорциональным их годовой расчетной лесосеке в разрезе мягколиственной древесины (табл. 1, рис. 2). Это было сделано из соображений равномерности и неистощительности лесопользования. В целях экономии пространства на рис. 2 и в дальнейшем в таблицах и на рисунках наименования лесничеств будут заменяться их номером в скобках в соответствии с табл. 1.

Таблица 1  
Распределение поставок сырья по лесничествам

Table 1  
Contribution of each forest district to the wood supply

Лесничество   Forest district	ID	Расчетная лесосека по листовенному хозяйству, м <sup>3</sup>   Deciduous Annual Allowable Cut, m <sup>3</sup>	Доля   Share	Плановые годовые поставки, м <sup>3</sup>   Annual deliveries, m <sup>3</sup>
Пудожское   Pudozhskoye	(1)	410 300	0,233	55 975
Суоярвское   Suoyarvskoye	(2)	165 700	0,094	22 606
Олонецкое   Olonetskoye	(3)	166 100	0,094	22 660

Пряжинское   Pryazhinskoye	(4)	339 700	0,193	46 344
Прионежское   Prionezhskoye	(5)	229 200	0,130	31 269
Кондопожское   Kondopozhskoye	(6)	183 600	0,104	25 048
Медвежьегорское   Medvezhyegorskoye	(7)	264 600	0,150	36 098
<b>Всего   Total</b>		<b>1 759 200</b>	<b>1</b>	<b>240 000</b>

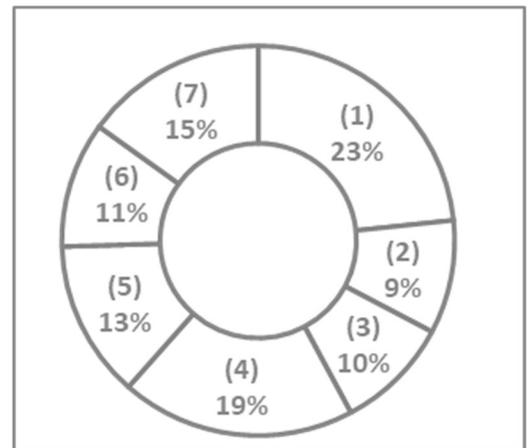


Рисунок 2. Распределение поставок сырья по лесничествам: (1)-(7)–коды лесничеств (см. табл. 1)

Figure 2. Contribution of each forest district to the wood supply: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 1)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

### Результаты и обсуждение

Для оценки величины транспортных затрат было выполнено 14 имитационных экспериментов в среде AnyLogic. В первых семи экспериментах пунктом назначения являлся г. Медвежьегорск, во вторых семи – п. Пряжа. Точкой отправления в каждом эксперименте было одно из семи рассматриваемых лесничеств. При этом места погрузки располагались вблизи географических центров лесничеств. Для определения средней эксплуатационной скорости движения автомобилей-сортиментовозов по маршруту в применяемой в данном исследовании имитационной модели используется так называемый метод контрольного транспортного средства.

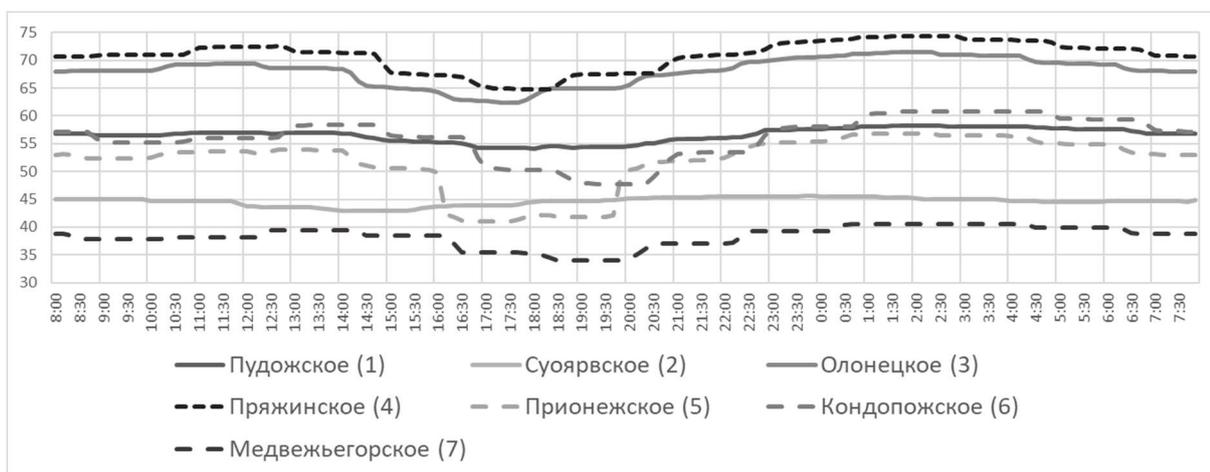
В общем случае метод контрольного транспортного средства заключается в прямом замере времени движения транспортного средства от места погрузки до места разгрузки. Для изучения динамики изменения эксплуатационной скорости в течение суток было принято решение имитировать отправку автомобилей-сортиментовозов грузоместимостью 40 м<sup>3</sup> из пунктов отправления с периодичностью 10 мин. К анализу представлялись результаты для полных суток, начиная с 8.00. Базовые скорости движения устанавливались для федеральных трасс – 90 км/ч, для региональных – 40-75 км/ч в зависимости от их состояния, для лесных дорог – 15-25 км/ч. Внутри населенных пунктов базовые скорости задавались в пределах 30-70 км/ч, при этом принималось во внимание наличие знаков, ограничивающих скорость, и светофорных объектов в каждом конкретном населенном пункте. Коэффициенту использования пробега в данном исследовании было задано значение 0,6, а коэффициенту снижения скорости – 0,008 в соответствии с рекомендациями [18]. Используемое в исследовании значение переменных затрат составляло 90 руб/км, постоянных затрат – 3500 руб/ч, суммарного времени погрузки и разгрузки – 1 час. Перерывы для отдыха водителей были заданы в соответствии с Приказом министерства транспорта Российской Федерации от 16.10.2020 № 424 [22] следующим образом: первый перерыв продолжительностью 45 мин. через 4 часа 30 минут после начала

движения и далее пятнадцатиминутные перерывы каждые полтора часа движения.

В результате моделирования были получены значения времени движения, эксплуатационной скорости и удельных транспортных затрат для каждого из рейсов, стартовавших каждые 10 мин. в течение суток. На рис. 3 показаны графики изменения эксплуатационной скорости в течение суток для случая с размещением производства гофрошпонных панелей в г. Медвежьегорске.

Можно видеть, что эксплуатационная скорость варьируется в широких пределах от маршрута к маршруту: минимальное значение составляет 34 км/ч, максимальное – 70 км/ч. Кроме того, хорошо видны заметные суточные колебания скорости. Колебания тем больше, чем выше интенсивность движения на участках дорожной сети, включенных в маршрут. Для всех маршрутов заметно снижение эксплуатационной скорости в случае начала движения в промежутке времени между 15.00 и 21.00. Такие же графики для случая с размещением производства гофрошпонных панелей в п. Пряжа, приведены на рис. 4.

Можно отметить общее снижение эксплуатационной скорости и сокращение ее разброса. Суммарные результаты экспериментов приведены в табл. 2, табл. 3 и на рис. 5.



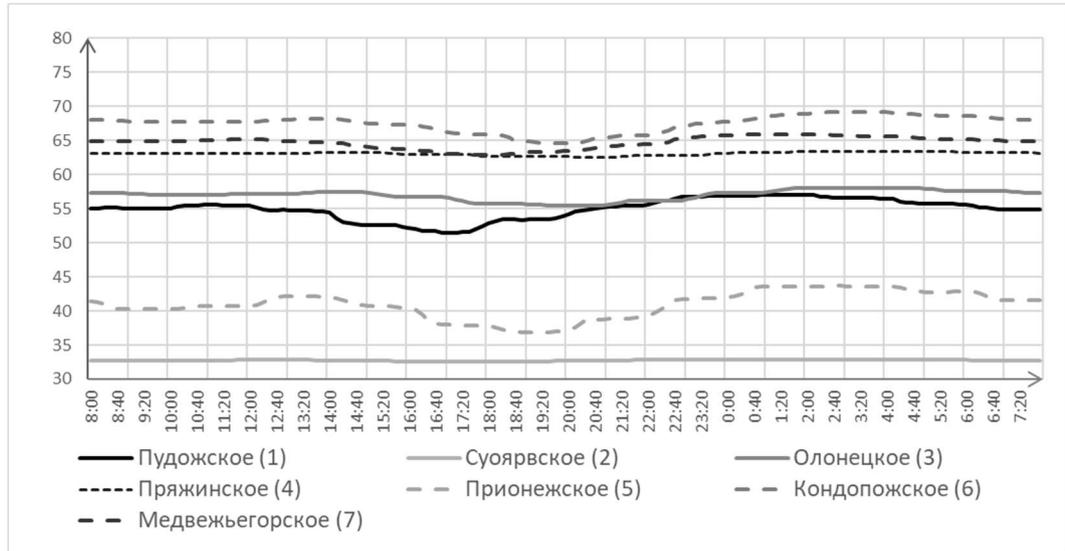


Рис. 4. Эксплуатационная скорость для случая с размещением производства в п. Пряжа, км/ч: (1)-(7)–коды лесничеств (см. табл. 1)

Figure 4. Operating speed for the case where the plant is located in Pryazha, km/h: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 1)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Таблица 2

Результаты (первая часть)

Table 2

Results (the first frame)

Лесничество   Forest district	ID	Длина маршрута, км   Distance, km			Годовой пробег, км x 10 <sup>3</sup>   Yearly run, km x 10 <sup>3</sup>			Суммарное время рейсов, ч x 10 <sup>3</sup>   Total truck operating time, h x 10 <sup>3</sup>		
		I	II	Изменение   Difference	I	II	Изменение   Difference	I	II	Изменение   Difference
Пудожское	(1)	221	414	+88%	308,8	579,9	+87,8%	327,8	633,7	+93,3%
Суоярвское	(2)	334	175	-47%	188,8	99,2	-47,5%	254,0	181,6	-28,5%
Олонецкое	(3)	267	74	-72%	151,0	41,9	-72,3%	133,4	44,1	-66,9%
Пряжинское	(4)	247	54	-78%	286,4	63,1	-78,0%	242,9	60,1	-75,3%
Прионежское	(5)	223	109	-51%	174,0	84,9	-51,2%	202,9	124,8	-38,5%
Кондопожское	(6)	86	140	+63%	53,9	87,7	+62,9%	57,8	78,1	+35,0%
Медвежьегорское	(7)	75	256	+240%	68,1	231,3	+239,6%	107,0	214,6	+100,6%
<b>Всего   Total</b>	-	-	-	-	<b>1230,9</b>	<b>1188,0</b>	<b>-3,5%</b>	<b>1325,8</b>	<b>1336,9</b>	<b>+0,8%</b>

I – Вариант с размещением производства в г. Медвежьегорске; | The plant located in the city of Medvezhyegorsk

II - Вариант с размещением производства в п. Пряжа | The plant located in in the village of Pryazha

Результаты (продолжение)

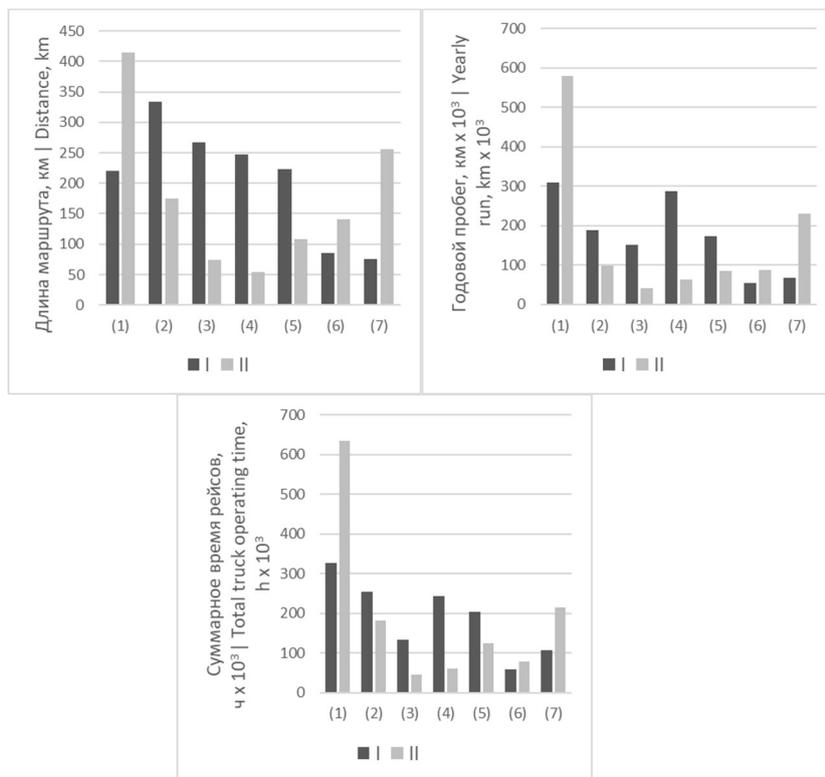
Table 3

Results (the second frame)

Лесничество   Forest district	ID	Средняя эксплуатационная скорость, км/ч   Average operating speed, km/h			Суммарные транспортные затраты, млн руб.   Costs per year, million rub.			Удельные транспортные затраты, руб/м <sup>3</sup>   Average unit costs, rub/m <sup>3</sup>		
		I	II	Изменение   Difference	I	II	Изменение   Difference	I	II	Изменение   Difference
Пудожское	(1)	56,5	55,0	-2,8%	70,3	128,9	+83,2%	1256,5	2302,0	+83,2%
Суоярвское	(2)	44,6	32,8	-26,6%	45,1	27,4	-39,2%	1996,0	1214,2	-39,2%
Олоньское	(3)	68,0	57,0	-16,3%	32,4	10,8	-66,6%	1430,3	478,0	-66,6%
Пряжинское	(4)	70,8	63,1	-11,0%	61,2	17,0	-72,2%	1320,2	367,4	-72,2%
Прионежское	(5)	51,9	40,9	-21,2%	40,7	22,8	-44,1%	1300,5	727,6	-44,1%
Кондопожское	(6)	56,1	67,4	+20,1%	13,6	19,9	+45,9%	544,7	794,6	+45,9%
Медвежьегорское	(7)	38,3	64,7	+68,9%	19,6	50,4	+156,8%	543,4	1395,4	+156,8%
<b>Всего   Total</b>	-	<b>55,9</b>	<b>55,6</b>	<b>-0,6%</b>	<b>283,0</b>	<b>277,2</b>	<b>-2,0%</b>	<b>1179,1</b>	<b>1155,0</b>	<b>-2,0%</b>

I – Вариант с размещением производства в г. Медвежьегорске; | The plant located in the city of Medvezhyegorsk;

II - Вариант с размещением производства в п. Пряжа | The plant located in in the village of Pryazha



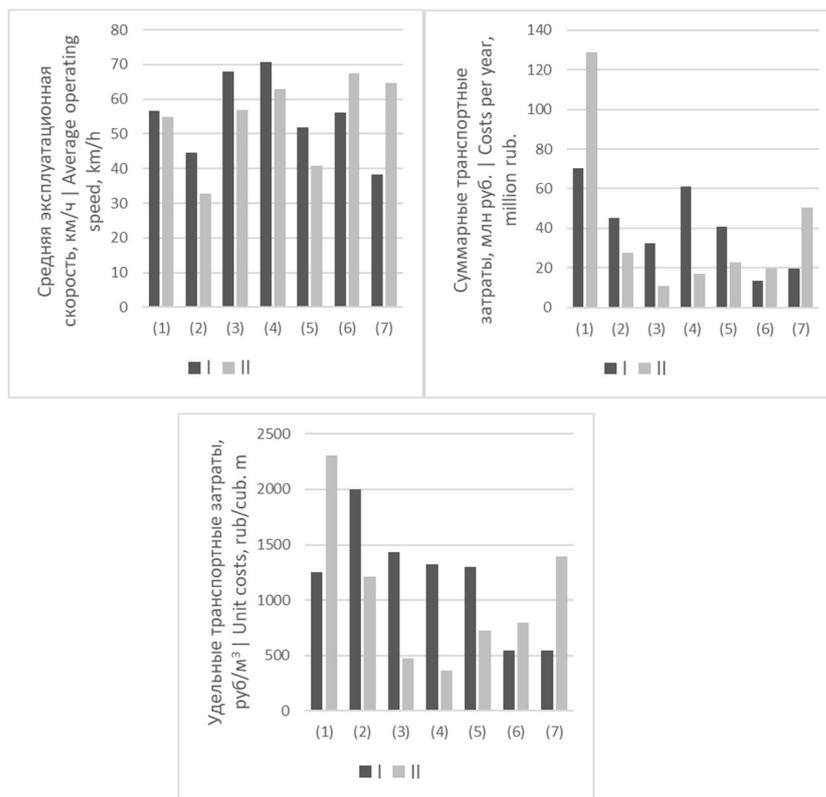


Рисунок 5. Суммарные результаты: (1)-(7) – коды лесничеств (см. табл. 1); I – Вариант с размещением производства в г. Медвежьегорске; II – Вариант с размещением производства в п. Пряжа

Figure 5. The summary results: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 1); I – The plant located in the city of Medvezhyegorsk; II – The plant located in in the village of Pryazha

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Результаты, представленные в табл. 2 и 3 и на рис. 5, позволяют сделать нижеследующие выводы. С точки зрения транспортных затрат более выгодным следует считать размещение предприятия по производству гофрошпонных панелей в п. Пряжа. В этом случае суммарные транспортные затраты оказываются меньше на 2%, что в абсолютном выражении соответствует экономии 5,8 млн. рублей в год.

При этом годовой пробег всех транспортных средств на перевозках мягколиственной древесины сокращается на 42 900 км, что составляет 3,5%, однако это не приводит к сокращению общего времени работы транспортных средств, т. к. средняя эксплуатационная скорость при размещении предприятия в Пряже оказывается на 0,6% меньше, чем в случае размещения в Медвежьегорске – сказывается расположение п. Пряжа вблизи со столицей Республики

Карелия г. Петрозаводском, т. е. в районе с гораздо большей интенсивностью движения по дорогам всех типов. Средние удельные транспортные затраты при размещении завода в Пряже оказываются меньше на 24,1 руб/м<sup>3</sup>.

Таким образом, сокращение пробега на 3,5% ведет к сокращению затрат только на 2%. Это еще раз подтверждает существенное влияние на эффективность транспортного процесса таких факторов, как интенсивность движения по разным участкам дорог, а также суточные ее колебания. Перенос производства с территории с меньшей интенсивностью дорожного движения (Медвежьегорск) на территорию с большей интенсивностью (Пряжа) привел к сокращению затрат на величину меньшую ожидаемой. Таким образом, при оценке эффективности организации транспортных потоков нецелесообразно ориентироваться только на изменение суммарного

пробега транспортных средств. Это подтверждает полезность описываемой в данной статье имитационной модели.

Кроме того, результаты моделирования показывают, что величина суточных колебаний эксплуатационной скорости существенно меньше в случае размещения производства в п. Пряжа (рис. 6).

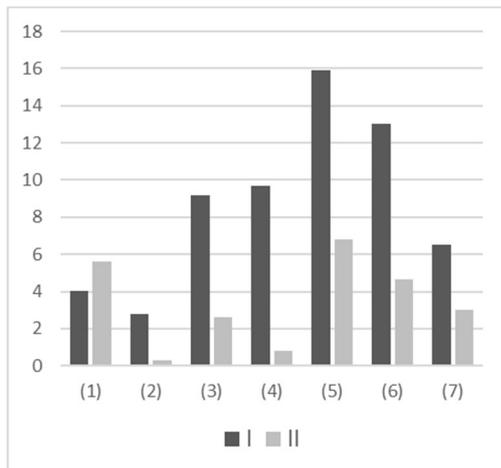


Рисунок 6. Размах средней оперативной скорости, км/ч.: (1)-(7) – коды лесничеств (см. табл. 1); I – Вариант с размещением производства в г. Медвежьегорске; II – Вариант с размещением производства в п. Пряжа

Figure 6. Average operating speed range, km/h.: (1)-(7) – forest district IDs (see Table 2); I – The plant located in the city of Medvezhyegorsk; II – The plant located in the village of Pryazha

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Наибольший размах эксплуатационной скорости в обоих случаях наблюдается на маршрутах с точкой погрузки в Прионежском лесничестве (ID 5). При доставке древесины в г. Медвежьегорск эксплуатационная скорость изменялась на этом маршруте на 16 км/ч в течение суток. При доставке древесины в п. Пряжа размах становится более чем в два раза меньшим – 6,8 км/ч.

Это связано с размещением производственной площадки в черте достаточно большого города, в котором существенно меньше средняя эксплуатационная скорость, а также велики ее суточные колебания. Пряжа же представляет собой не слишком большой поселок городского типа.

Наибольшие значения размаха для Прионежского лесничества связаны с тем, что оба рассматриваемые маршрута в этом случае пролегают через территорию г. Петрозаводска – самого крупного города и столицы Республики Карелия.

Необходимо отметить, что результаты, представленные в таблице 2, в таблице 3 и на рис. 5. получены для случая круглосуточного и равномерного в течение суток осуществления перевозок. В случае использования другого режима работы, будут получены другие результаты. На рис. 7 представлены результаты для нескольких альтернативных режимов: дневного, ночного, круглосуточного, с прибытием транспортных средств на пункты назначения в дневное время.

Как и следовало ожидать, наибольшие удельные затраты приходятся на режим, предполагающий перевозки только в дневное время: с 8.00 до 20.00. В случае осуществления перевозок в ночное время, можно получить экономию 2 – 3,5 млн. руб. в год. Также на рис. 8 приведен вариант, когда предприятие осуществляет приемку груза только в дневное время. В этом случае затраты оказываются в целом чуть меньше, чем в случае круглосуточной работы. Кроме того, на графиках приведен случай, обозначенный как «Минимум» и представляющий собой затраты, определенные для самого выгодного из всех рассматриваемых 144 рейсов в сутки (с периодичностью 10 мин). Основные параметры этих рейсов приведены в таблице 4.

Все наиболее выгодные рейсы отправляются в ночное время и прибывают в точку назначения ранним утром. Учитывая, что при грузоподъемности автомобилей-сортиментовозов в 40 м<sup>3</sup>, число рейсов в день по разным лесничествам варьируется от 1 до 4, вполне возможно организовать перевозку в оптимальные сроки. В этом случае можно достичь годовой экономии 3,5 – 5 млн. руб., в зависимости от места расположения производства (рис. 8).

## Выводы

С помощью предложенной имитационной модели поставок древесины возможно получать достаточно точные оценки эксплуатационной скорости автомобилей-сортиментовозов на конкретном

маршруте в разное время суток. Благодаря этому появляется возможность сравнения экономической эффективности различных вариантов организации транспортных потоков.

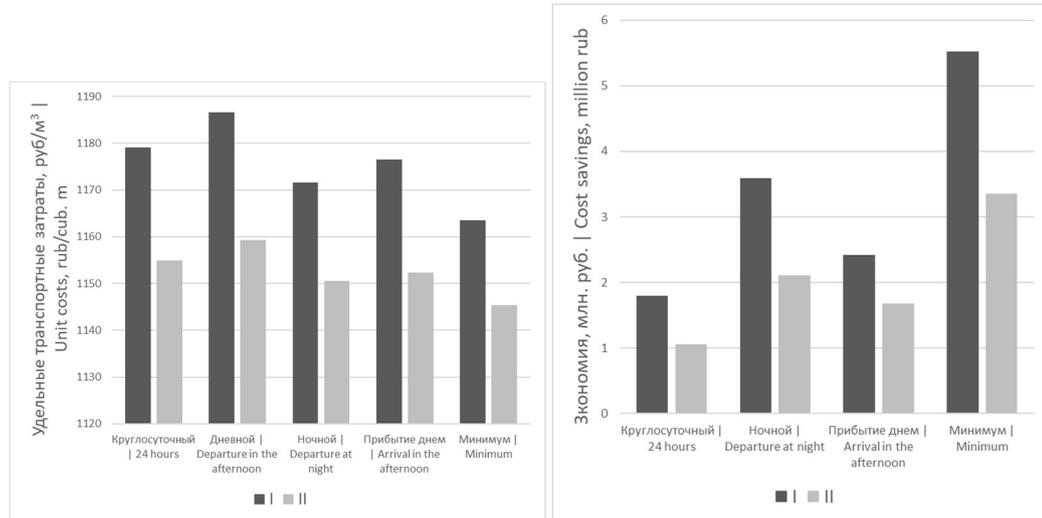


Рисунок 7. Результаты для альтернативных режимов работы: I – Вариант с размещением производства в г. Медвежьегорске; II – Вариант с размещением производства в п. Пряжа

Figure 7. The results for alternative operating modes: I – The plant located in the city of Medvezhyegorsk; II – The plant located in in the village of Pryazha

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Таблица 4

### Оптимальные рейсы

Table 4

### The best runs

Лесничество   Forest district	ID	Медвежьегорск   Medvezhyegorsk			Пряжа   Pryazha		
		Отправление   Departure	Прибытие   Arrival	Удельные затраты, руб/куб. м   Unit costs, rub/cub. m	Отправление   Departure	Прибытие   Arrival	Удельные затраты, руб/куб. м   Unit costs, rub/cub. m
Пудожское	(1)	2:10	5:57	1246,7	0:50	8:05	2277,3
Суоярвское	(2)	23:50	7:09	1981,3	1:40	7:00	1212,4
Олонецкое	(3)	2:00	5:43	1413,3	2:30	3:46	476,0
Пряжинское	(4)	2:40	5:59	1305,1	2:40	3:31	367,0
Прионежское	(5)	2:10	6:04	1264,3	2:40	5:09	712,5
Кондопожское	(6)	3:00	4:24	533,8	2:40	4:41	790,1
Медвежьегорское	(7)	2:40	4:31	533,5	0:50	4:43	1389,2
<b>Всего   Total</b>	-	-	-	<b>1163,5</b>	-	-	<b>1145,4</b>

Полезность модели подтверждается на конкретном примере решения задачи выбора места размещения нового производства. Полученные результаты подтверждают необходимость учета особенностей конкретных участков дорожной сети, включая суточные колебания интенсивности движения, при оценке транспортных затрат. Выполнение оценки эффективности только на основе изменения пробега транспортных средств может приводить к достаточно большим погрешностям при определении транспортных затрат.

Кроме того, модель позволяет выполнять оценку различных вариантов режимов работы мощностей на перевозках древесины и выявлять наиболее эффективные промежутки времени внутри суток для совершения рейсов с наименьшими удельными затратами.

В данном исследовании из соображений равномерности и неистощительности лесопользования вклад каждого из семи лесничеств в снабжение предприятия по производству гофрошпонных панелей был принят пропорциональным их годовой расчетной лесосеке в разрезе мягколиственной древесины (табл. 1, рис. 2) и не подлежал варьированию.

Принимая во внимание значительное превышение расчетной лесосеки над плановыми объемами поставок внутри равномерного сценария, представляется вполне допустимым изменение баланса поставок в пользу тех лесничеств, для которых значение транспортных затрат является более выгодным. Это может привести к существенному сокращению удельных и суммарных транспортных затрат.

Например, в случае с размещением предприятия по производству гофрошпонных панелей в п. Пряжа наивысшее значение удельных транспортных затрат показывает маршрут доставки древесины из Пудожского лесничества (рис. 5). Существенно сократить транспортные затраты удастся, если, например, отказаться от поставок из Пудожского лесничества и передать соответствующие объемы в Пряжинское лесничество, которое обладает достаточным запасом по расчетной лесосеке (табл. 1). Мы не стали приводить результаты моделирования для данного и подобных ему случаев. Это может стать темой для дальнейших исследований с использованием разработанной модели.

## Список литературы

1. Соколов А.П., Питухин Е.А., Шабаетов А.И., Галактионов О.Н., Зятева О.А. Концепция информационной системы поддержки принятия решений по повышению эффективности функционирования лесного комплекса. // Программная инженерия. – 2023. – Т.14, № 9. – С.419-430. DOI: <https://doi.org/10.17587/prin.14.419-430>
2. Galaktionov O.N., Sukhanov Yu.V., Vasilev A.S., Kuzmenkov A.A. Corrugated veneer joinery and construction material and its sound insulation properties // E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2024) – 2024. – N531. – P.01042. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202453101042>
3. Galaktionov O.N., Sukhanov Yu.V., Vasilev A.S., Kuzmenkov A.A., Kuznecov A.V., Lukashevich V.M. Evaluating thermal insulation property of the corrugated veneer birch wood panel offered to use as a modern cladding material for interior decoration // Ad Alta: Journal of Interdisciplinary Research. – 2023. – vol.13, N2. – P.357-360. DOI: <http://dx.doi.org/10.33543/1302>
4. Audy J., D'Amours S., Rönnqvist M. Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review // International Journal of Forest Engineering. – 2022. – 34(5). – P. 1-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>
5. Ivannikov V., Bukhtoyarov V., Kvitko K., Shvyrev A. Improvement of the methodology for the design of technological transport of timber industry enterprises // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – vol. 1001. – 012031. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012031>

6. Leonello E.C., Acuna M., Brown M., Esperancini M.S.T., Ballarin A.W., Guerra S.P.S., Eufrade-Junior H.d.J. The Impact of Wood Moisture Content on the Productivity and Costs of Forest Energy Supply Chains in Southeast Brazil // *Forests*. – 2024. – 15. – 139. DOI: <https://doi.org/10.3390/fl5010139>
7. Mokhirev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Analysis of the cost structure of timber transportation and their seasonal dynamics // *Forestry Engineering Journal*. – 2020. – 10(2). – P. 123-133. DOI: <http://dx.doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/12>
8. Hasani A., Khosrojerdi A. Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study. // *Transport Res E-Log*. – 2016. – N87. – P. 20-52. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.009>
9. Ivanov D., Tspoulanidis A., Schönberger J. *Global Supply Chain and Operations Management: A decision-oriented introduction into the creation of value*. – New York: Springer, 2017. – 578 p.
10. Ivanov D. *Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management* – New York: Springer, 2018. – 320 p.
11. Mistree F., Allen, J., Khosrojerdi A., Rasoulifar G. *Architecting Fail Safe Supply Networks*. – CRC Press, 2017. – 358 p.
12. Алферьев Д.А. Агент-ориентированное моделирование устойчивой лесной деятельности // *Искусственные общества*. – 2023. – Т. 18. – Выпуск 4. DOI: <http://dx.doi.org/10.18254/S207751800028426-7>
13. Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри // *Лесотехнический журнал*. – 2017. – №3. – С.307-314. DOI: [http://dx.doi.org/10.12737/article\\_59c2140d704ae5.63513712](http://dx.doi.org/10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712)
14. Рукомойников К.П., Мохирев А.П., Медведев С.О., Дербенева Е.Ю. Отдельные особенности имитационного моделирования технологического процесса вывозки древесины // *Наука и бизнес: пути развития*. – 2020. – № 10 (112). – С. 104-107.
15. Кручинин И.Н. Имитационное моделирование взаимодействия ходовой части лесотранспортной машины с опорной поверхностью // *Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе*. – 2016. – Т. 1. – С. 62-65.
16. Легкий С.А. Методический подход к расчету тарифов на грузовые автомобильные перевозки // *Вести Автомобильно-дорожного института*. – 2022. – №1(40). – С. 64-75.
17. Соколов А.П. Оценка эффективности процессов транспортировки древесины с помощью имитационного моделирования // *Ресурсы и технологии: интеграция науки и бизнеса: Материалы I Международного инженерного форума*. – Петрозаводск, 2024. – С.232-235.
18. Шведовский П.В., Клебанюк Д.Н. *Изыскания и проектирование автомобильных дорог*. – Москва: Инфра-Инженерия, 2021. – 616 с.
19. Goryaeva E.V., Mokhirev A.P., Medvedev S.O., Bragina N.A. Analysis of the Distribution of Movement Speed from Time of Day // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – 720. – 012029. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012029>
20. Маркуц В.М. *Транспортные потоки автомобильных дорог*. – Москва: Инфра-Инженерия, 2018. – 148 с.
21. Стратегия развития лесного комплекса Республики Карелия до 2030 года: Утверждена распоряжением Правительства Республики Карелия № 235р-П 29 марта 2019 г. – 56 с.
22. Об утверждении особенностей режима рабочего времени и времени отдыха, условий труда водителей автомобилей: Приказ Министерства транспорта РФ от 16 октября 2020 г. № 424.

### References

1. Sokolov A.P., Pitukhin E.A., Shabaev A.I., Galaktionov O.N., Zyateva O.A. *Koncepciya informacionnoj sistemy podderzhki prinyatiya reshenij po povysheniyu effektivnosti funkcionirovaniya lesnogo kompleksa*. [The Concept of an Information System to Support Decision-Making to Improve the Efficiency of the Forest Complex]. *Programmnyaya inzheneriya = Software Engineering*. 2023; 14(9): 419-430. (in Rus) DOI: <https://doi.org/10.17587/prin.14.419-430>

2. Galaktionov O.N., Sukhanov Yu.V., Vasilev A.S., Kuzmenkov A.A. *Corrugated veneer joinery and construction material and its sound insulation properties*. E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2024). 2024; 531: 01042. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202453101042>
3. Galaktionov O.N., Sukhanov Yu.V., Vasilev A.S., Kuzmenkov A.A., Kuznecov A.V., Lukashevich V.M. *Evaluating thermal insulation property of the corrugated veneer birch wood panel offered to use as a modern cladding material for interior decoration*. Ad Alta: Journal of Interdisciplinary Research. 2023; 13(2): 357-360. DOI: <http://dx.doi.org/10.33543/1302>
4. Audy J., D'Amours S., Rönnqvist M. *Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review*. International Journal of Forest Engineering. 2022; 34(5): 1-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2022.2142367>
5. Ivannikov V., Bukhtoyarov V., Kvitko K., Shvyrev A. *Improvement of the methodology for the design of technological transport of timber industry enterprises*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020; 1001: 012031. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012031>
6. Leonello E.C., Acuna M., Brown M., Esperancini M.S.T., Ballarin A.W., Guerra S.P.S., Eufrade-Junior H.d.J. *The Impact of Wood Moisture Content on the Productivity and Costs of Forest Energy Supply Chains in Southeast Brazil*. Forests. 2024; 15: 139. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15010139>
7. Mokhirev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. *Analysis of the cost structure of timber transportation and their seasonal dynamics*. Forestry Engineering Journal. 2020; 10(2): 123-133. DOI: <http://dx.doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/12>
8. Hasani, A., Khosrojerdi, A. *Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study*. Transport Res E-Log. 2016; 87: 20-52. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.009>
9. Ivanov D., Tsipoulanidis A., Schönberger J. *Global Supply Chain and Operations Management: A decision-oriented introduction into the creation of value*. New York: Springer, 2017: 578.
10. Ivanov D. *Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management*. New York: Springer, 2018, 320 p.
11. Mistree F., Allen, J., Khosrojerdi A., Rasoulifar G. *Architecting Fail Safe Supply Networks*. CRC Press, 2017, 358 p.
12. Alferev D.A. *Agent-orientirovanoe modelirovanie ustojchivoj lesnoj deyatelnosti*. [Agent-based Modeling of Sustainable Forestry Activities]. Iskusstvennye obshchestva = Artificial societies. 2023; 18(4). (in Rus). DOI: <http://dx.doi.org/10.18254/S207751800028426-7>
13. Sokolov A.P., Osipov E.V. *Imitacionnoe modelirovanie proizvodstvennogo processa zagotovki drevesiny s pomoshch'yu setej Petri*. [Simulation of the production process of timber harvesting with the help of petri nets]. Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2017; 3: 307-314. (in Rus). DOI: [http://dx.doi.org/10.12737/article\\_59c2140d704ae5.63513712](http://dx.doi.org/10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712)
14. Rukomojnikov K.P., Mohirev A.P., Medvedev S.O., Derbeneva E.YU. *Otdel'nye osobennosti imitacionnogo modelirovaniya tekhnologicheskogo processa vyvozki drevesiny* [Some features of simulation modeling of the technological process of timber transportation] Nauka i biznes: puti razvitiya = Science and business: development ways. 2020; 10 (112): 104-107. (in Rus)
15. Kruchinin I.N. *Imitacionnoe modelirovanie vzaimodejstviya hodovoj chasti lesotransportnoj mashiny s opornoj poverhnost'yu* [Simulation modeling of the interaction of the chassis of a forestry machine with the supporting surface]. Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse = Modernization and scientific research in the transport complex. 2016; 1: 62-65. (in Rus)

16. Legkij S.A. *Metodicheskiy podhod k raschetu tarifov na gruzovye avtomobil'nye perevozki*. [Methodological approach to calculating tariffs for road freight transportation]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta*. 2022; 1(40): 64-75. (in Rus)
17. Sokolov A.P. *Ocenka effektivnosti processov transportirovki drevesiny s pomoshch'yu imitacionnogo modelirovaniya*. [Evaluation of the efficiency of timber transportation processes using simulation modeling]. *Resursy i tekhnologii: integraciya nauki i biznesa: Materialy I Mezhdunarodnogo inzhenernogo foruma*. Petrozavodsk, 2024: 232-235. (in Rus)
18. Shvedovskij P.V., Klebanyuk D.N. *Izyskaniya i proektirovanie avtomobil'nyh dorog*. [Surveying and designing of highways]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2021: 616. (in Rus)
19. Goryaeva E.V., Mokhirev A.P., Medvedev S.O., Bragina N.A. *Analysis of the Distribution of Movement Speed from Time of Day*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021; 720: 012029. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012029>
20. Markuts V.M. *Transportnye potoki avtomobil'nyh dorog*. [Traffic flows on highways]. Moscow: Infra-Inzheneriya, 2018: 148.
21. *Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Respubliki Kareliya do 2030 goda*: Uтверждена распоряжением Правительст ва Respubliki Kareliya N 235r-P, 29 March 2019: 56. (in Rus)
22. *Ob utverzhdenii osobennostej rezhima rabochego vremeni i vremeni otдыha, uslovij truda vodite-lej avtomobilej*: Prikaz Ministerstva transporta RF, 16 Oktober 2020, 424. (in Rus)

### Сведения об авторах

*Соколов Антон Павлович* – доктор техн. наук, профессор, зав/ кафедрой транспортных и технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0798-4634>, e-mail: [a\\_sokolov@psu.karelia.ru](mailto:a_sokolov@psu.karelia.ru).

### Information about authors

*Anton P. Sokolov* – Dr. Sci. (Tech.), Head of the Department of transporting and technology machinery and equipment, Petrozavodsk State University, Lenin av., 33, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0798-4634>, e-mail: [a\\_sokolov@psu.karelia.ru](mailto:a_sokolov@psu.karelia.ru).

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/9>

УДК 631.632



## Экспериментальные исследования по определению максимального усилия по извлечению семян с закрытой корневой системой из ячейки кассеты

Кристина Н. Черник<sup>1</sup>✉, [k.n.chernik@mail.ru](mailto:k.n.chernik@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1203-4825>

Сергей Г. Елисеев<sup>1</sup>, [s-555s@yandex.ru](mailto:s-555s@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», проспект им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660034, Российская Федерация

Лесовосстановительные работы, в том числе с сеянцами с закрытой корневой системой характеризуются высокой трудоемкостью и энергозатратами. В настоящее время посадка сеянцев с закрытой корневой системой осуществляется вручную или с использованием лесопосадочных машин, агрегируемых с тракторами, где оператор подает сеянцы в посадочный аппарат. При использовании автоматических агрегатов на манипуляторах харвестеров или экскаваторов сеянцы также извлекаются вручную, что указывает на зависимость от человеческого фактора и слабые места технологии. Актуальность исследования заключается в разработке автоматизированной системы подачи сеянцев. Объектом исследования данной научной работы является процесс извлечения сеянцев с закрытой корневой системой из ячеек кассет. Предмет исследования – усилие, возникающее при извлечении сеянцев с закрытой корневой системой из ячеек. Цель работы – определение усилия, возникающего во время извлечения сеянцев с закрытой корневой системой из ячеек кассет при заданных условиях, необходимого для разработки автоматизированной системы подачи сеянцев в посадочный аппарат. В процессе работы проводилось исследование влияния параметров корневой системы сеянца на величину усилия, необходимого для извлечения сеянца из ячейки. Исследование проводилось на базе универсальной испытательной машины УТС-110МН-30-0У, где измерение усилия в процессе извлечения сеянца из ячейки каждого опыта осуществлялось и записывалось в реальном времени. Результаты исследования: выполнен расчет усилия при извлечении сеянца из ячейки с использованием прикладной математической программы Mathcad; получена зависимость величины усилия, необходимого для извлечения сеянца из ячейки от параметров корневой системы; экспериментально определено максимальное и минимальное значение усилия, необходимого для извлечения сеянца из ячейки. Полученные результаты, в дальнейшем, будут использованы для оптимизации подбора исполнительных элементов разрабатываемой автоматизированной системы подачи сеянцев в посадочный аппарат.

**Ключевые слова:** лесовосстановление, автоматизация, лесопосадочная машина, сеянец, закрытая корневая система, лесопосадочный аппарат

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Черник К.Н. Экспериментальные исследования по определению максимального усилия по извлечению сеянцев с закрытой корневой системой из ячейки кассеты / К.Н. Черник, С.Г. Елисеев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 138-153. – Библиогр.: с. 150-153 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/9>.

*Поступила* 23.12.2024. *Пересмотрена* 14.02.2025. *Принята* 04.03.2025. *Опубликована онлайн* 24.03.2025.

## Experimental studies to determine the maximum effort to extract containerized tree seedling from a cassette cell

Kristina N. Chernik<sup>1</sup>✉, k.n.chernik@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1203-4825>

Sergey G. Eliseev<sup>1</sup>, s-555s@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

<sup>1</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

### Abstract

Reforestation works, including those with containerized tree seedling, are characterized by high labor and energy consumption. Currently, planting containerized tree seedling is carried out manually or with the use of forest planting machines aggregated with tractors, where the operator feeds the seedlings into the planting machine. When using automatic units on manipulators of harvesters or excavators, seedlings are also extracted manually, indicating the dependence on human factor and weaknesses of the technology. The relevance of the research is to develop an automated seedling feeding system. The object of study of this research paper is the process of extracting containerized tree seedling from the cells of cassettes. The subject of the study is the force arising during the extraction of containerized tree seedling from the cells. The aim of the work is to determine the force arising during the extraction of a containerized tree seedling from the cells of cassettes under given conditions, necessary for the development of an automated system for feeding seedlings into the planting machine. In the process of work, the influence of the parameters of the containerized tree seedling on the amount of force required to extract the seedling from the cell was investigated. The study was conducted on the basis of the universal testing machine UTS-110MN-30-0U, where the measurement of force during the process of seedling extraction from the cell of each experiment was carried out and recorded in real time. Results of the study: the calculation of the effort required to extract the seedling from the cell using Mathcad applied mathematical program was performed; the dependence of the amount of effort required to extract the seedling from the cell on the parameters of the root system was obtained; the maximum and minimum value of the effort required to extract the seedling from the cell was determined experimentally. The obtained results will be further used to optimize the selection of actuating elements of the developed automated system of seedling feeding into the planting unit.

**Keywords:** *reforestation, automation forest, planting machine, seedling, containerized tree seedling, forest planting machine.*

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declares no conflict of interest.

**For citation:** Chernik K.N., Eliseev S.G. (2025). Experimental studies to determine the maximum effort to extract containerized tree seedling from a cassette cell. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 138-153 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/9>

*Received* 23.12.2024. *Revised* 14.02.2025. *Accepted* 04.03.2025. *Published online* 24.03.2025.

### Введение

Проблемы и вызовы современного лесного хозяйства в значительной степени связаны с необходимостью удовлетворения растущих потребностей

населения Земли в древесине, используемой для производства множества потребительских товаров [1]. Кроме того, существует необходимость внедрения принципов устойчивого лесного производства,

которые обеспечат безопасность работников, поддержат экологический баланс и гарантируют достаточный уровень производительности [2,3]. Реализация этих принципов может быть достигнута путем широкого внедрения автоматизации и роботизации производственных процессов в лесном хозяйстве, особенно для задач, требующих ручного труда, таких как посадка семян с закрытой корневой системой (ЗКС) при искусственном лесовосстановлении.

Анализ существующих устройств и машин, используемых для посадки семян с ЗКС, показывает, что в основном используются простые ручные инструменты и классические сажалки, агрегируемые с сельскохозяйственными тракторами [4]. Есть также несколько машин, предлагающих определенный уровень автоматизации посадки, особенно в аспекте посадки семян с ЗКС [5-15]. Однако, эти устройства все еще требуют значительного количества ручных операций, таких как перемещение семян из контейнеров в накопители, из которых они затем собираются автоматическими системами для посадки в почву [16-20]. Польскими инженерами разработан прототип мобильного автоматического устройства для выполнения задач по лесовосстановлению (RoboFoR). Основной задачей этого транспортно-технологического комплекса является посадка семян с закрытой корневой системой, которые в процессе лесопосадки извлекаются непосредственно из кассет для выращивания ЗКС [21]. В Швеции разработана автоматическая система подачи семян MagMat для посадочного устройства Bracke. MagMat вмещает 320 ед. посадочного материала в восьми кассетах для выращивания. Устройство еще не находится в коммерческом производстве, но, как сообщают зарубежные исследователи, оценки и анализ рабочего времени показали, что MagMat может обеспечить существенное повышение производительности процесса и снизить стоимость работ по лесовосстановлению [22].

В целях повышения производительности механизированной посадки Risutec Ltd. и UPM Forest разработали автоматическую кассету для подачи семян Risutec APC, которая вмещает более 1200 семян и прикреплена к одноблочному посадочному устройству. Финские специалисты отмечают, что Risutec APC еще предстоит оценить, но

можно предположить, что производительность аналогична производительности Bracke P11.a (от 324 до 355 семян в час) с меньшим временем, затрачиваемым на перезарядку кассеты. Сеянцы загружаются по лоткам, избавляя оператора от необходимости вручную загружать их по одному [22].

В течение нескольких лет шведские ученые работали над проектом Autoplant. Концепция проекта включает в себя несколько подсистем, а именно: восстановление и планирование маршрута, автономное вождение (планирование пути), новую технологию восстановления леса с минимальным воздействием на окружающую среду, автоматическую подачу семян, планирование движения стрелы манипулятора с рабочим органом, обнаружение мест посадки и последующее наблюдение. Шведские ученые отмечают, что Autoplant может решить проблемы, связанные с будущим развитием, например, соотношение между стоимостью машины и рабочей скоростью, надежностью датчиков в ответ на вибрации и погодные условия, а также точностью определения размера и типа препятствий во время автономного вождения и посадки [23].

Исходя из вышеизложенного следует, что эффективность механизированной посадки определяется эффективностью подачи семян в лесопосадочный аппарат. При разработке механизма, автоматической подачи семян из кассеты в лесопосадочный аппарат, одним из важных параметров является усилие, возникающее при извлечении семени из ячейки кассеты. Поэтому целью данного исследования является определение усилия, возникающего во время извлечения семян с ЗКС из ячеек кассет при заданных условиях. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить составляющие усилия, возникающего во время извлечения семян из ячеек; провести расчет усилия извлечения семени; провести натурные испытания с последующим анализом результатов.

### Материалы и методы

Измерение усилия, возникающего во время извлечения семян с ЗКС из ячеек кассет, проводилось в июне 2024 г. с применением универсальной испытательной машины УТС-110МН-30-0У. В качестве объекта исследования использовались сеянцы

1- летней сосны обыкновенной с ЗКС, выращенные в специальных кассетах для хвойных деревьев. Семена сеянцев были посеяны 18.05.2023 г. На момент испытания сеянцы имели высоту от 15 до 25 см, диаметр корневой шейки варьировался в пределах от 2,1 до 2,9 мм. Кассета для сеянцев с ЗКС изготовлена из полипропилена. Основные характеристики кассеты: Д×В×Ш (мм) кассеты: 385×385×73, размер ячейки (мм): 41×41×73, объем ячейки (см<sup>3</sup>): 85, количество ячеек: 81, вес кассеты 970 г (рис. 1).



Рисунок 1 - Кассета с сеянцами  
Figure 1 - Cassette with seedlings

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

Захват корневой шейки осуществлялся разработанным в программе КОМПАС 3D и напечатанным на 3D принтере захватным устройством (рис. 2). Площадь рабочей поверхности пластин захвата была подобрана таким образом, чтобы обеспечить достаточное трение без критических повреждений корневой шейки при извлечении сеянца.



Рисунок 2 – Захватное устройство для сеянцев с ЗКС.

1 – втулка-крепление; 2 – основание захвата; 3 – прижимная пластина; 4 – пружина; 5 – регулировочная пластина; 6 – направляющие.

Figure 2 – Gripping device for containerized tree seedling

1 – fastening sleeve; 2 – gripper base; 3 – pressure plate; 4 – spring; 5 – adjustment plate; 6 – guides.

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

Чтобы минимизировать влияние силы трения покоя на величину усилия извлечения сеянца из ячейки использовались напечатанные на 3D принтере толкатели высотой 5, 10 и 15 мм, позволяющие предварительно частично извлечь сеянец из ячейки (рис. 3).

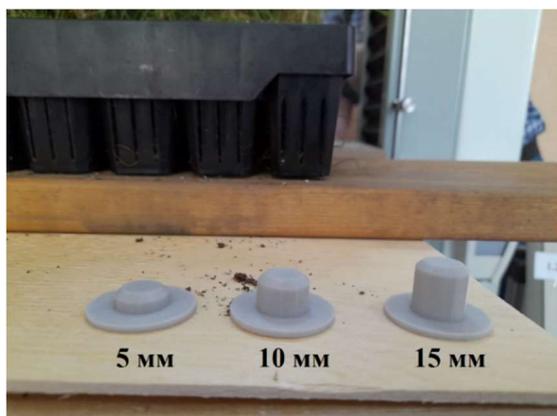


Рисунок 3 – Толкатели для частичного извлечения сеянцев из ячейки

Figure 3 – Pushers for partial extraction of seedlings from the cell

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Для записи результатов испытаний использовалось стандартное программное обеспечение, используемое при работе испытательной машины УТС-110МН-30-0У и USB флэш-накопитель. Машина работала в режиме Испытание «Растяжение» с постоянной скоростью перемещения подвижной траверсы.

Испытания осуществлялись в следующем порядке:

1. Захватное устройство для сеянцев с ЗКС устанавливалось с помощью втулки-крепления на подвижную траверсу универсальной испытательной машины.

2. Кассета с сеянцами помещалась на специальный столик, который закреплялся на неподвижной траверсе таким образом, чтобы захват находился над крайним рядом ячеек кассет.

3. При проведении опыта с использованием толкателей разного размера, производилась установка толкателя до упора в круглое центральное отверстие, расположенное на дне ячейки.

4. С помощью цифрового дисплея универсальной испытательной машины устанавливались требуемые параметры для проведения испытаний.

5. Захват устанавливался у основания корневой шейки, усилие удержания сеянца регулировалось с помощью регулировочной пластины.

6. Захват, закрепленный на траверсе испытательной машины, поднимал сеянцы на высоту

100 мм с постоянной скоростью равной 500 мм/мин. В процессе извлечения сеянцев из кассеты испытательная машина строила график зависимости усилия ( $F$ , Н) от перемещения ( $L$ , мм).

7. После извлечения захватом первого крайнего ряда сеянцев, производилось перемещение столика с кассетой на величину равную одному ряду для извлечения следующего ряда сеянцев.

8. Полученные данные выводились на цифровой дисплей в виде графиков и таблицы с массивом данных, и сохранялись для дальнейшего анализа, в названии файла указывался номер опыта.

Поскольку при извлечении сеянца из кассеты, корни, вышедшие за пределы ячейки, создают дополнительное сопротивление, которое необходимо учитывать при проектировании полностью автоматизированных комплексов для посадки сеянцев с ЗКС возникла необходимость в исследовании влияния наличия корневой системы за пределами ячеек кассет. Корни, застревающие в вертикальных технологических отверстиях (направляющих), подвергаются растяжению, в связи с этим, помимо других сил, возникают продольные силы корней, которые необходимо учитывать при моделировании процесса извлечения сеянцев.

Исходя из этого в процессе извлечения сеянцев из ячеек кассет возникают следующие силы: сила трения покоя, сила тяжести сеянца и продольные силы корней, зацепившихся за ячейку кассеты при вытягивании. В случае, если движение сеянца неравномерное, добавляется сила инерции. На рис. 4 представлена схема извлечения сеянца из ячейки кассеты.

В начальный момент времени извлечения сеянца действует сила трения покоя:

$$F_{mp} = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

где  $\mu$  - коэффициент трения кома почвы о стенки кассеты;

$m$  - масса сеянца, кг;

$\alpha$  - угол между стенкой ячейки и горизонталью.

При этом,

$$\alpha = \arctg \cdot \left( \frac{2h_k}{a_1 - a_2} \right), \quad (2)$$

где  $h_k$  – высота кома почвы сеянца, мм;

$a_1$  – ширина верхнего основания кома почвы, мм;

$a_2$  – ширина нижнего основания кома почвы, мм.

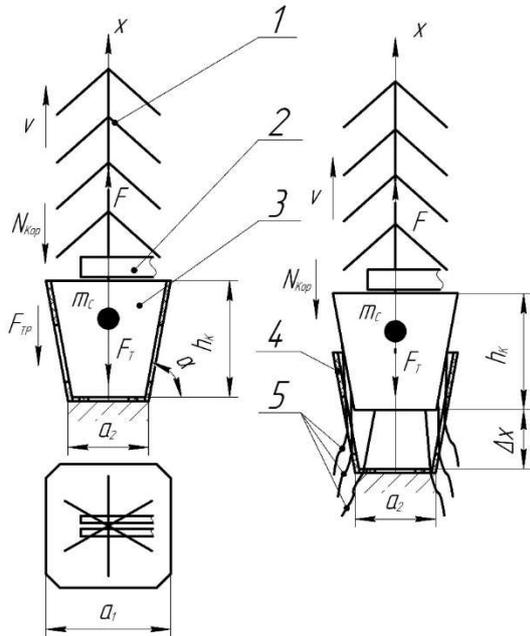


Рисунок 4 – Схема извлечения сеянца с ЗКС из ячейки кассеты.

1 – сеянец; 2 – захватное устройство; 3 – ком почвы; 4 – ячейка кассеты; 5 – корни сеянца

Figure 4 – Scheme of extracting a containerized tree seedling a cassette cell.

1 – seedling; 2 – gripping device; 3 – soil lump; 4 – cassette cell; 5 – seedling roots

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

Усилие  $N_{kop}$  изменяется в процессе извлечения сеянца из ячейки и зависит от количества корней, застрявших в полостях ячеек и подвергнувшихся растяжению, их диаметров и текущей величины напряжения каждого корня.

Текущее значение продольной силы одного корня, оказывающего сопротивление при извлечении сеянца из кассеты, определяли по формуле:

$$N_i = A_i \cdot \sigma_i \quad (3)$$

где  $A_i$  – площадь поперечного сечения корня,  $m^2$ ;

$\sigma_i$  – напряжение, возникающее в корне при растяжении.

Суммарное текущее значение продольных сил корней, оказывающих сопротивление при извлечении сеянца из кассеты, определялось по формуле:

$$N_{kop} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \sigma_i \quad (4)$$

где  $n$  – количество корней, оказывающих сопротивление движению сеянца в текущий момент времени.

Эмпирическим путем было установлено, что диаметр корней, вышедших за пределы ячейки, варьируется в пределах от 0,40 до 0,85 мм (рис. 5).



Рисунок 5 – Корни, вышедшие за пределы ячейки кассеты

Figure 5 – Roots extending beyond the cell of the cassette

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

Исходя из того, что в процессе извлечения сеянца из кассеты величина суммарного усилия, возникающего от продольных сил корней, носит случайный характер, не представлялось возможным точно описать данный процесс теоретически. Поэтому было принято решение определить зависимость величины усилия извлечения сеянца из ячейки от количества корней, одновременно испытывающих предельные напряжения при различных значениях их диаметров.

Усилие, необходимое для извлечения сеянцев из ячейки определялось по следующей формуле:

$$F_{II} = F_{TP} + F_T + N_{kop} + F_i, \quad (5)$$

где  $F_T$  – сила тяжести сеянца, Н;

$F_i$  – сила инерции сеянца, Н. При равномерном прямолинейном движении  $F_i = 0$ .

Средняя масса сеянцев определялась на основе данных, полученных от красноярского лесничества по формуле:

$$m_c = \frac{m_o - m_k}{n_y} \quad (6)$$

где  $m_o$  – общая масса кассеты с сеянцами, кг;

$m_k$  – масса пустой кассеты, кг;

$n_y$  – количество ячеек в кассете.

Для получения экспериментальных значений усилия, необходимого для извлечения сеянца из кассеты под воздействием управляемых факторов, необходимо было провести серию опытов. В этих целях была разработана матрица планирования эксперимента, основными факторами в которой выступили: обрезка корней на дне кассеты и высота толкателя (табл. 1). Определение необходимого числа повторностей опытов  $n$  осуществлялась по стандартной методике [25].

Для определения предельных напряжений, возникающих при растяжении корней применялась следующая методика [24]. На точные весы устанавливалась с помощью специальных скоб металлическая пластина весом 1,5 кг для обеспечения запаса датчика весов при «отрицательном» взвешивании. Один конец корня длиной 10 см закреплялся на цилиндрический стержень диаметром 2 мм, который фиксировался к точным весам с помощью канцелярского скотча, а за другой конец тянули вверх перпендикулярно плоскости рабочей поверхности весов, предварительно обнулив показания весов, при этом велась видеозапись показаний на экране весов (рис. 6). В процессе натяжения корня при определенном усилии происходит разрыв. По видеозаписи определялась максимальная масса в момент разрыва корня. По полученной массе определялось усилие. Предельные напряжения определялись по формуле (3). После проведения ряда испытаний было получено среднее значение предельных напряжений.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

Table 1

Experimental Design Matrix

№ опыта  № experience	Факторы  Factors		Показатель цели  Goal indicator
	Обрезка корней (да, нет)  Root pruning (yes, no)	Высота толкателя, мм  Height of the pusher, mm	Максимальное усилие извлечения сеянца из ячейки, Н  Maximum force for extracting a seedling from a cell, N
1.n	да  yes	0	F <sub>1</sub>
2.n	нет  no	0	F <sub>2</sub>
3.n	да  yes	5	F <sub>3</sub>
4.n	нет  no	5	F <sub>4</sub>
5.n	да  yes	10	F <sub>5</sub>
6.n	нет  no	10	F <sub>6</sub>
7.n	да  yes	15	F <sub>7</sub>
8.n	нет  no	15	F <sub>8</sub>

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Authors' calculations

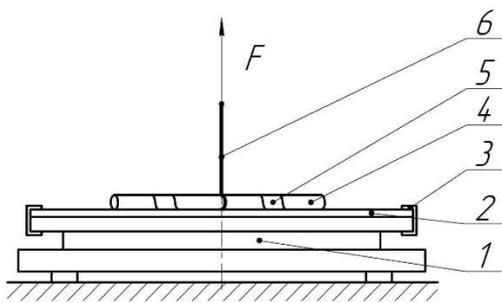


Рисунок 6 – Схема определения предельных напряжений, возникающих при растяжении корней.

1 – весы; 2 – металлическая пластина; 3 – крепежные скобы; 4 – цилиндрический стержень; 5 – канцелярский скотч, 6 – корень.

Figure 6 – Scheme for determining the ultimate stresses arising from root extension.

1 – scales; 2 – metal plate; 3 – fastening brackets; 4 – cylindrical rod; 5 – office tape, 6 – root.

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Для автоматизации расчётов по определению усилия, необходимого для извлечения сеянцев с ЗКС из ячейки кассеты, было использовано программное обеспечение MatchCAD (рис. 7).

Расчет усилия при вытаскивании сеянца

$m := 61 \cdot 10^{-3}$  масса сеянца, кг  
 $g := 9.81$  ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>  
 $\alpha := 85 \text{ deg}$  угол между стенкой кассеты и горизонталью, град  
 $\mu := 0.5$  коэффициент трения  
 $D := 0.8 \cdot 10^{-3}$  диаметр корня, м  
 $\sigma_{pr} := 6.122 \cdot 10^6$  предельные напряжения корней при растяжении, Па  
 $a := 0$  ускорение, м/с<sup>2</sup>  
 $n := 6$  количество корней, шт

Площадь сечения, м<sup>2</sup>

$$A_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 5.027 \times 10^{-7}$$

Сила трения покоя, Н

$$F_{tr} := \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) = 0.026$$

Усилие сопротивления корней в момент разрыва, Н

$$N_{kor} := A \cdot \sigma_{pr} \cdot n = 18.464$$

Сила тяжести, Н

$$F_t := m \cdot g = 0.598$$

Сила инерции, Н

Сила вытягивания сеянца из ячейки, Н

$$F_j := m \cdot a = 0$$

$$F_c := F_{tr} + N_{kor} + F_t + F_j = 19.088$$

Рисунок 7 – Расчет усилия при вытаскивании сеянца из ячейки

Figure 7 – Calculation of the force when pulling a seedling out of a cell

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

## Результаты

В соответствии с описанной методикой определения суммарного значения продольных сил корней были проведены исследования по результатам которых были получены зависимости усилия вытягивания сеянца от количества около предельно нагруженных корней при различных значениях их диаметров (рис. 8).

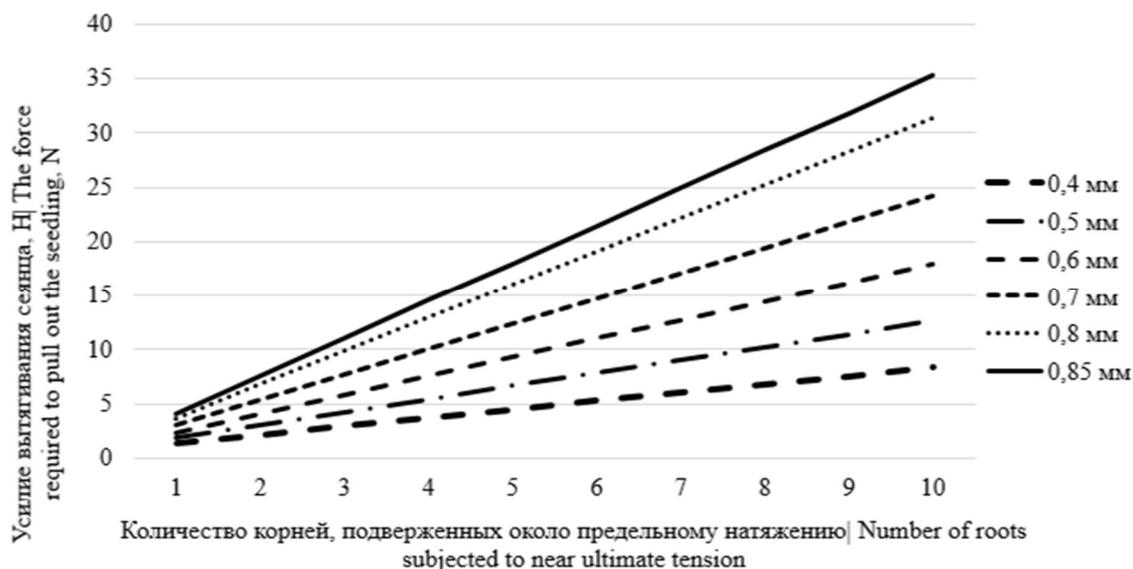


Рисунок 8 – График зависимостей усилия извлечения сеянца от количества корней, подверженных около предельным напряжениям

Figure 8 – Graph of the dependence of the seedling extraction force on the number of roots subjected to near-limit stresses

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' composition

При проведении исследований по извлечению сеянцев из ячеек кассет был проведен предварительный эксперимент для определения необходимого числа повторностей опытов. Определение величины усилия по извлечению сеянца из кассеты осуществлялось в соответствии с ранее описанной методикой с использованием универсальной испытательной машины УТС-110МН-30-0У. Результаты обработки эксперимента представлены в табл. 2. Значение критерия Стьюдента (t-критерия) определялось по табличным значениям, при доверительной вероятности 0,95 и числу степеней свободы, равному 7 [25].

Таблица 2  
Результаты обработки предварительного эксперимента  
Table 2  
Results of processing the preliminary experiment

Параметр  Parameter	Значение  Magnitude
Среднее арифметическое значение выборки, $\bar{y}$   Arithmetic mean of the sample	19,9
Количество опытов, n   Number of experiments	8
Выборочная дисперсия, $s^2$   Sample variance	2,28
Среднее квадратичное отклонение, $s$   Standard deviation	1,51
Вариационный коэффициент, $\nu$   Variation coefficient	7,57
Значение критерия Стьюдента при P=0,95; f=7   The meaning of the Student's criterion	2,3

Ошибка среднего арифметического, $m$   Error of the arithmetic mean	$\pm 1,265$
Расчетный критерий Стьюдента при крайнем верхнем отклонении, $t_{py_{max}}$   Student's t-test	1,364
Расчетный критерий Стьюдента при крайнем нижнем отклонении, $t_{py_{min}}$   Student's t-test	1,748

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Authors' calculations

В результате анализа предварительного эксперимента расчетные критерии Стьюдента при крайних положениях оказались ниже табличного

значения, то есть  $t_{py_i} < t$ , следовательно, количество повторностей для проведения эксперимента выбрано достаточное.

С учетом полученных предварительных данных была проведена серия экспериментов по извлечению семян из ячеек кассет в соответствии с описанной методикой и матрицей планирования эксперимента, представленной в табл. 1. По результатам проведенных исследований были получены зависимости усилия извлечения семени из ячейки от перемещения последнего для каждого опыта (рис. 9) и максимальные значения усилия при извлечении семян (табл. 3, рис. 10).

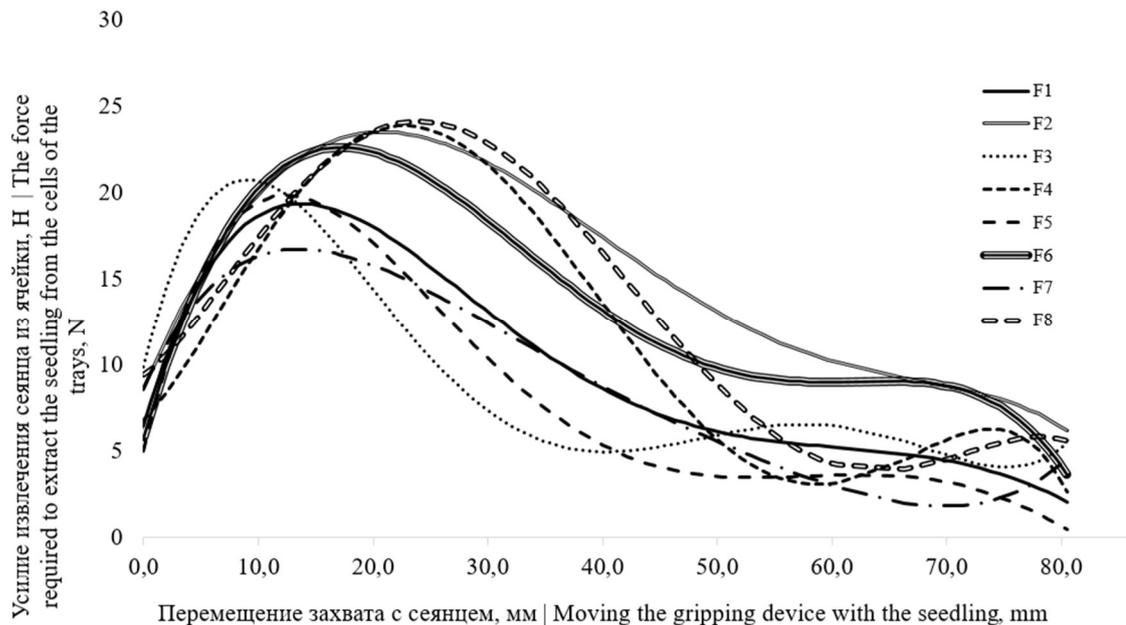


Рисунок 9 – Изменение усилия извлечения семени из ячейки в зависимости от предварительной подготовки  
 Figure 9 – Change in the force required to extract a seedling from a cassette cell depending on preliminary preparation

Источник: Собственная композиция авторов  
 Source: authors' composition

Результаты обработки эксперимента с обрезкой корней, без толкателя

Table 3

Results of processing the experiment with root pruning, without a pusher

№ опыта  Experience No.	Среднее пиковое значение с доверительным интервалом, Н  Average peak value with confidence interval	Количество повторностей, n  Number of repetitions	Выборочная дисперсия  Sample variance	Среднквадратическое отклонение  Standard deviation	Коэффициент вариации  Coefficient of variation	Точность опыта, %  Accuracy of experience
1.n	20,48±1,217	8	1,48	1,217	5,94	4,98
2.n	22,60±1,053	8	1,58	1,257	5,69	4,77
3.n	18,73±0,936	8	1,32	1,149	6,13	4,997
4.n	23,90±1,019	8	1,48	1,217	5,09	4,27
5.n	17,83±0,881	8	1,23	1,109	6,22	4,94
6.n	22,57±1,096	8	1,71	1,308	5,79	4,86
7.n	16,56±0,814	8	1,19	1,09	6,59	4,92
8.n	24,10±1,115	8	1,77	1,330	5,52	4,63

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Authors' calculations

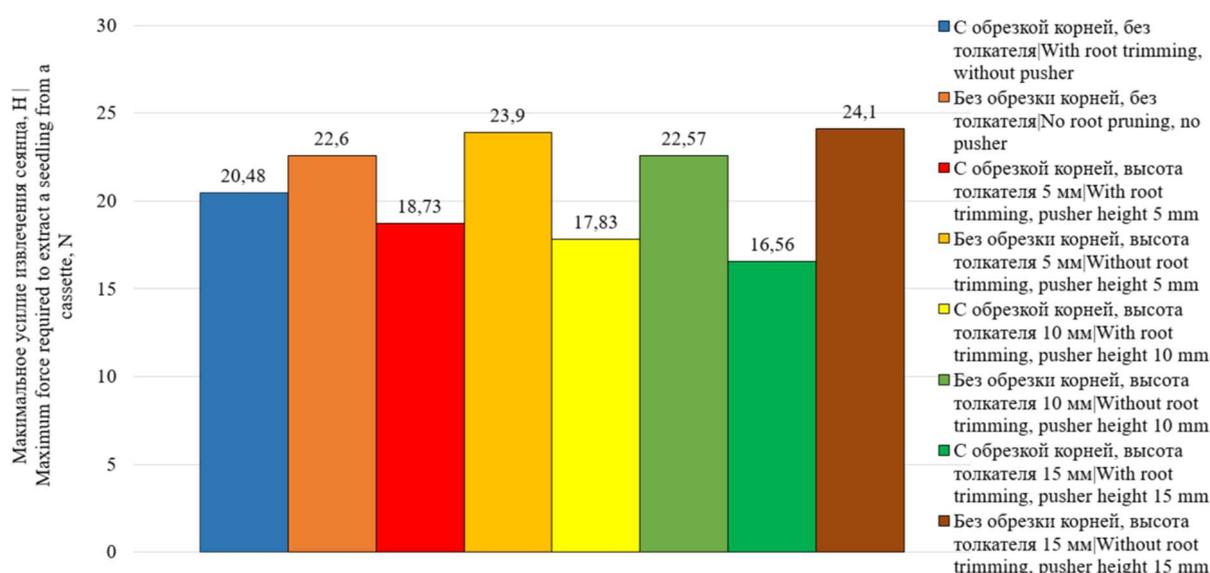


Рисунок 10 – Максимальные значения усилий извлечения сеянцев из ячеек

Figure 10 – Maximum values of force required to extract seedlings from the cells of the cassettes

Источник: Собственная композиция авторов

Source: authors' composition

### Обсуждение

Согласно графику изменения усилия извлечения сеянца из ячейки в зависимости от представленной подготовки (рис. 10) минимальное значение усилия извлечения сеянца возникает в том случае,

когда в процессе извлечения сеянца один корень с минимальным диаметром подвержен около предельному растяжению и величина этого усилия составляет 1,39 Н. Максимальное значение усилия возникает в случае, когда 10 корней с максимальным

диаметром одновременно подвержены около предельному растяжению, величина усилия составляет 35,36 Н, при этом сила тяжести и сила трения покоя в совокупности не превышают 2 % от общей силы.

Анализ данных показал, что при обрезке корней (F1, F3, F5, F7) пиковое значение усилия извлечения сеянца смещается к началу координат абсцисс и находится в пределах от 8,8 до 13,8 мм, а без обрезки корней (F2, F4, F6, F8) пиковые значения смещаются ближе к середине координаты перемещения захвата в пределах от 16,7 до 23,0 мм. Это объясняется тем, что часть необрезанных корней, застревая в технологических отверстиях, помимо растягивания проскальзывают и исходя из этого общее пиковое сопротивление возникает несколько позже, чем у обрезанных корней. При этом характер у всех кривых примерно одинаковый.

В серии опытов с применением толкателей, но без обрезки корней значимого влияния высоты толкателя зафиксировано не было. Это подтверждает, что сила трения, возникающая в начальный момент времени при движении сеянца ничтожно мала в сравнение с сопротивлением корней сеянцев.

Согласно данным представленным в таблице 3 и на рисунке 10 наибольшие значения усилия, необходимого для извлечения сеянцев из ячеек, приходится на вариант эксперимента без обрезки корней с толкателем высотой 15 мм – 24,1 Н. Наименьшее значение усилия наблюдается при максимальном значении высоты толкателя и предварительной обрезки корней сеянцев – 16,56 Н, что меньше наибольшего значения на 31 %. Применение 5 мм толкателя с обрезкой корней обеспечивает снижение усилия извлечения на 8,5 % с 20,48 до 18,73 Н, а использование 10 мм толкателя снижает усилие почти на 13 % до 17,83 Н. В тоже время как применение толкателей без обрезки корней, оказалось неэффективным. Усилие извлечения сеянцев в этом случае не только не уменьшалось, но и имело тенденцию к увеличению. При применении толкателя 15 мм в среднем усилие увеличивалось с 22,6 Н до 24,1, Н. А применение 5 и 10 мм толкателей без обрезки корней вообще не имело достоверных различий изменения усилия в сравнении с сеянцами, извлеченными без толкателей. В целом эксперименты

с варьированием высоты толкателя при необрезанных с внешней стороны дна кассеты корнях показали, что использование толкателей из-за защемления корней не оказывает существенного влияния на величину максимального усилия извлечения сеянца из ячейки. При этом использование толкателей высотой более 15 мм приводило к значительному наклону стебля сеянца от его начального положения, что усложняет позиционирование захватного устройства при извлечении сеянца и может привести к его повреждению.

Помимо определения максимального усилия при извлечении сеянцев из кассет оценивалось и их состояние. После каждого испытания производился визуальный осмотр стволиков сеянцев в месте их фиксации зажимом на предмет повреждения. По итогам серии испытаний, повреждения стволиков сеянцев и разрушения кома сеянцев после извлечения зафиксированы не были. В дальнейшем сеянцы были высажены на территории университета и показали практически 100 % приживаемость.

### Заключение

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Наибольшее влияние на величину усилия извлечения сеянца из ячейки оказывает продольная сила корней. В то время, как сила трения и тяжести сеянца суммарно составляют незначительную величину (до 4,3 %) от общего усилия, основное влияние оказывает продольная сила корней. Обрезка корней и использование толкателей позволяют обеспечить снижение максимального усилия при извлечении сеянца более чем на 30 %. При этом использование толкателей без обрезки корней нецелесообразно, поскольку не обеспечивается снижение усилия извлечения сеянца, а в некоторых случаях, наоборот, увеличивает.

2. Обрезка корней позволяет снизить усилие извлечения сеянца из ячейки кассеты с 22,6 Н до 20,48 Н, а с добавлением толкателя высотой 15 мм - до 16,56 Н. При разработке автоматизированной системы подачи сеянцев из кассеты в посадочный аппарат необходимо обеспечить усилие: без обрезки корней, без толкателей – 22,6 Н; с обрезкой корней и с толкателем максимальной высоты – 16,56 Н.

Во втором случае к процессу добавляются две дополнительные операции: обрезка корней и выталкивание сеянцев из ячеек кассеты. При этом следует отметить, что для исполнительного органа машины разность между максимальным и минимальным значениями не существенна.

3. Исходя из полученных результатов, для автоматизированного извлечения сеянцев из кассет

нет необходимости добавлять операции в технологический процесс, такие как обрезка и предварительное выталкивание кома из ячеек, поскольку сеянцы не получают повреждений при извлечении и без подготовительных операций, а разность максимального и минимального усилия извлечения сеянца из ячейки не существенна для машины.

### Список литературы

1. Sobocki S., Adamczyk F., Tylek P., Szaroleta M., Zurowski K., Kormanek M., Szewczyk G., Tabor S., Zwierzyński M., Kaźmierczak M. A Seedling Collection Unit of a Mobile Automatic Device for Forest Tree Planting—An Extended Operating Concept. *Forests*, 2023; 14(12): 2420. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14122420>
2. Sobocki S., Wojciechowski J., Legutko S., Mac J., Zawada M., Szymczyk S. Field robots development in the aspect of achieving the goals of sustainable agriculture. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, The 25th Edition of IManEE 2021 International Conference (IMANEE 2021)*, Online, 21–22 October 2021; IOP Publishing: Bristol, UK, 2021; 1235. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14122420>
3. Angelstam P., Bush T., Manton M. Challenges and Solutions for Forest Biodiversity Conservation in Sweden: Assessment of Policy, Implementation Outputs, and Consequences. *Land*, 2023; 12: 1098. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12051098>
4. Драпалюк М. В., Стасюк В.В., Зеликов В.А. Новые конструкции универсальных лесопосадочных машин для посадки сеянцев с открытой и закрытой корневой системой. *Лесотехнический журнал*. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 112–123. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10>
5. Manner J., Ersson B.T. Mechanized tree planting in Nordic forestry: simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. *J. For. Sci*, 2021; 67: 242–246. DOI: <https://doi.org/10.17221/203/2020-JFS>
6. Ghaffariyan M.R. A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. *Silva Balcanica*, 2021; 22(2): 25–32. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e64233>
7. Ramantswana M., Guerra S.P.S., Ersson B.T. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. *Curr. Forestry Rep*, 2020; 6: 143–158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00114-7>
8. Soler R.R., Guerra S.P.S., Oguri G., Rodrigues S.A. Economic Evaluation and Performance of a Tree Planting Machine Performing in Two Different Slope Classes and Conditions of Harvesting Slash. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2024; 45(1). DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2209>
9. Khoza M.J., Ramantswana M.M., Spinelli R., Magagnotti N. Enhancing Silvicultural Practices: A Productivity and Quality Comparison of Manual and Semi-Mechanized Planting Methods in KwaZulu-Natal, South Africa. *Forests*, 2024; 15: 2045. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15112045>
10. Liang J., Sawut M., Cui J., Hu X., Xue Z., Zhao M., Zhang X., Rouzi A., Ye X., Xilike A. Object-oriented multi-scale segmentation and multi-feature fusion-based method for identifying typical fruit trees in arid regions using Sentinel-1/2 satellite images. *Scientific Reports*, 2024; 14(1): 18230. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68991-7>
11. Zhu B., Liu J., Yang C., Qu W., Ding P. Power Compensation Strategy and Experiment of Large Seedling Tree Planter Based on Energy Storage Flywheel. *Forests*, 2023; 14: 1039. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14051039>
12. Wu X., Jiang Z., Zhang L., Hu X., Li W. Optimization Design and Experimentation of a Soil Covering Device for a Tree Planting Machine. *Agriculture*, 2024; 14(3): 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14030346>
13. Ersson B.T., Sundblad L.-G., Manner J. Cost analysis of seedling supply systems adapted for mechanized tree planting: a case study from southern Sweden. *Silva Fennica*, 2022; 56(2): 10663. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10663>

14. Ghaffariyan M.R. An overview of work productivity evaluation of farm tractors in timber skidding operations. *Silva Balcanica*, 2022; 23(1): 21-36. DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e82383>
15. Герц Э.Ф., Мехренцев А.В., Побединский В.В. Повышение эффективности мультифункциональных машин для ведения интенсивного лесного хозяйства. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. – 2021. – № 1 (379). – С. 138-149. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-138-149>
16. Rautio P., Lideskog H., Bergsten U., Karlberg M. Lean forestry — A paradigm shift from economies of scale to precise and sustainable use of ecosystem services in forests. *Forest Ecology and Management*, 2023; 530: 120766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120766>
17. Zelikov V.A., Kadali B.R., Stasyuk V.V., Kazachek M.N. Use of fuses of increased accuracy in the drives of rotary forestry machines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020; 012065. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012065>
18. Sikstrom U., Hjelm K., Holt H.K., Saksa T., Wallertz K. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. *Silva Fennica*, 2020; 54(2): 10172. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10172>
19. Turunen M.T., Rasmus S., Järvenpää J., Kivinen S. Relations between forestry and reindeer husbandry in northern Finland – Perspectives of science and practice. *Forest Ecology and Management*, 2020; 457: 117677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117677>
20. Huuskonen S., Domisch T., Finér L., Hantula J., Hynynen J., Matala J., Miina J., Neuvonen S., Nevalainen S., Niemisto P., Nikula A., Piri T., Siitonen J., Smolander A., Tonteri T., Uotila K., Viiri H. What is the potential for replacing monocultures with mixed-species stands to enhance ecosystem services in boreal forests in Fennoscandia? *Forest Ecology and Management*, 2021; 479: 118558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118558>
21. Tadeusiewicz R., Tylek P., Adamczyk F., Pietrzykowski M., Szewczyk G., Szychta M., Kielbasa P., Sobocki S., Danielak M., Juliszewski T. RoboFoR—Automat do sadzenia drzew. Podstawowe moduły i właściwości funkcjonalne. *Nauka Tech. Technol.*, 2022; 6: 119–136. DOI: [https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9\\_7](https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9_7)
22. Черник К.Н., Лозовой В.А. Анализ производительности машин дискретного действия, применяемых для механизированной посадки семян с закрытой корневой системой. *Аграрный научный журнал*. – 2024. – № 1. – С. 136-144. – DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i1pp136-144>
23. Hansson L., Sten G., Rossander M., Lideskog H., Manner J., van Westendorp R., Li S., Eriksson A., Wallner A., Rönnqvist M. Autoplant—Autonomous Site Preparation and Tree Planting for a Sustainable Bioeconomy. *Forests*, 2024; 15(2): 263. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15020263>
24. Байдаев Д.М., Егорова Е.М., Фисун М.Н. Прочность на разрыв и якорность корневых систем древесно-кустарниковых растений в условиях высокогорий. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2006. – № 13. – С. 134-136. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23749465&ysclid=m6g4j5374n689194023>
25. Pruthi T., Srivastava N., Rana V., Kaushik N., Kaur N. Research methodology and design: A powerful tool for scientific data. *J Adv Med Dent Scie Res*, 2021; 9(11): 52-57. DOI: <https://doi.org/10.2176/jamdsr>

### References

1. Sobocki S., Adamczyk F., Tylek P., Szaroleta M., Zurowski K., Kormanek M., Szewczyk G., Tabor S., Zwierzyński M., Kaźmierczak M. A Seedling Collection Unit of a Mobile Automatic Device for Forest Tree Planting—An Extended Operating Concept. *Forests*, 2023; 14(12): 2420. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14122420>
2. Sobocki S., Wojciechowski J., Legutko S., Mac J., Zawada M., Szymczyk S. Field robots development in the aspect of achieving the goals of sustainable agriculture. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, The 25th Edition of IManEE 2021 International Conference (IMANEE 2021)*, Online, 21–22 October 2021; IOP Publishing: Bristol, UK, 2021; 1235. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14122420>

3. Angelstam P., Bush T., Manton M. Challenges and Solutions for Forest Biodiversity Conservation in Sweden: Assessment of Policy, Implementation Outputs, and Consequences. *Land*, 2023; 12: 1098. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12051098>
4. Drapalyuk M.V., Stasyuk V.V., Zelikov V.A. *Novye konstrukcii universal'nyh lesoposadochnyh mashin dlya posadki seyancev s otkrytoj i zakrytoj kornevoj sistemoj* [New designs of universal planting machines for planting seedlings with an open and closed root system]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry engineering magazine*, 2021; 11; 4 (44): 112–123. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10>
5. Manner J., Ersson B.T. Mechanized tree planting in Nordic forestry: simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. *J. For. Sci*, 2021; 67: 242–246. DOI: <https://doi.org/10.17221/203/2020-JFS>
6. Ghaffariyan M.R. A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. *Silva Balcanica*, 2021; 22(2): 25-32. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e64233>
7. Ramantswana M., Guerra S.P.S., Ersson B.T. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. *Curr. Forestry Rep*, 2020; 6: 143–158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00114-7>
8. Soler R.R., Guerra S.P.S., Oguri G., Rodrigues S.A. Economic Evaluation and Performance of a Tree Planting Machine Performing in Two Different Slope Classes and Conditions of Harvesting Slash. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2024; 45(1). DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2209>
9. Khoza M.J., Ramantswana M.M., Spinelli R., Magagnotti N. Enhancing Silvicultural Practices: A Productivity and Quality Comparison of Manual and Semi-Mechanized Planting Methods in KwaZulu-Natal, South Africa. *Forests*, 2024; 15: 2045. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15112045>
10. Liang J., Sawut M., Cui J., Hu X., Xue Z., Zhao M., Zhang X., Rouzi A., Ye X., Xilike A. Object-oriented multi-scale segmentation and multi-feature fusion-based method for identifying typical fruit trees in arid regions using Sentinel-1/2 satellite images. *Scientific Reports*, 2024; 14(1): 18230. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68991-7>
11. Zhu B., Liu J., Yang C., Qu W., Ding P. Power Compensation Strategy and Experiment of Large Seedling Tree Planter Based on Energy Storage Flywheel. *Forests*, 2023; 14: 1039. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14051039>
12. Wu X., Jiang Z., Zhang L., Hu X., Li W. Optimization Design and Experimentation of a Soil Covering Device for a Tree Planting Machine. *Agriculture*, 2024; 14(3): 346. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14030346>
13. Ersson B.T., Sundblad L.-G., Manner J. Cost analysis of seedling supply systems adapted for mechanized tree planting: a case study from southern Sweden. *Silva Fennica*, 2022; 56(2): 10663. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10663>
14. Ghaffariyan M.R. An overview of work productivity evaluation of farm tractors in timber skidding operations. *Silva Balcanica*, 2022; 23(1): 21-36. DOI: <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e82383>
15. Gerc Je.F., Mehrencev A.V., Pobedinskij V.V. *Povyshenie jeffektivnosti mul'tifunktional'nyh mashin dlja vedenija intensivnogo lesnogo hozjajstva* [Improving the efficiency of multifunctional machines for intensive forestry]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal = News of higher educational institutions. Forest Magazine*, 2021; 1(379): 138-149. (In Russ.). DOI: [10.37482/0536-1036-2021-1-138-149](https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-1-138-149)
16. Rautio P., Lideskog H., Bergsten U., Karlberg M. Lean forestry — A paradigm shift from economies of scale to precise and sustainable use of ecosystem services in forests. *Forest Ecology and Management*, 2023; 530: 120766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120766>
17. Zelikov V.A., Kadali B.R., Stasyuk V.V., Kazachek M.N. Use of fuses of increased accuracy in the drives of rotary forestry machines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020; 012065. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012065>
18. Sikstrom U., Hjelm K., Holt H.K., Saksa T., Wallertz K. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. *Silva Fennica*, 2020; 54(2): 10172. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10172>

19. Turunen M.T., Rasmus S., Järvenpää J., Kivinen S. Relations between forestry and reindeer husbandry in northern Finland – Perspectives of science and practice. *Forest Ecology and Management*, 2020; 457: 117677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117677>
20. Huuskonen S., Domisch T., Finér L., Hantula J., Hynynen J., Matala J., Miina J., Neuvonen S., Nevalainen S., Niemisto P., Nikula A., Piri T., Siitonen J., Smolander A., Tonteri T., Uotila K., Viiri H. What is the potential for replacing monocultures with mixed-species stands to enhance ecosystem services in boreal forests in Fennoscandia? *Forest Ecology and Management*, 2021; 479: 118558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118558>
21. Tadeusiewicz R., Tylek P., Adamczyk F., Pietrzykowski M., Szewczyk G., Szychta M., Kiełbasa P., Sobocki S., Danielak M., Juliszewski T. RoboFoR—Automat do sadzenia drzew. Podstawowe moduły i właściwości funkcjonalne. *Nauka Tech. Technol.*, 2022; 6: 119–136. DOI: [https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9\\_7](https://doi.org/10.7494/978-83-67427-15-9_7)
22. Chernik K.N., Lozovoy V.A. *Analiz proizvoditel'nosti mashin diskretnogo dejstviya, primenyaemyh dlya mekhanizirovannoy posadki seyancev s zakrytoj kornevoj sistemoy* [Performance analysis of a discrete-action machine used for mechanized planting of seedlings with a closed root system]. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal = Agrarian Scientific Journal*, 2024; 1: 136-144. (In Russ.) DOI: 10.28983/asj.y2024i1pp136-144.yu
23. Hansson L., Sten G., Rossander M., Lideskog H., Manner J., van Westendorp R., Li S., Eriksson A., Wallner A., Rönnqvist M. Autoplant—Autonomous Site Preparation and Tree Planting for a Sustainable Bioeconomy. *Forests*, 2024; 15(2): 263. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15020263>
24. Baidaev D.M., Egorova E.M., Fisun M.N. *Prochnost' na razryv i yakornost' kornevykh sistem drevesno-kustarnikovyyh rasteniy v usloviyah vysokogorij* [Tensile strength and anchorage of root systems of trees and shrubs in high-land conditions]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa = Actual problems of the forest complex*, 2006; 13: 134-136. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23749465&ysclid=m6g4j5374n689194023>
25. Pruthi T., Srivastava N., Rana V., Kaushik N., Kaur N. Research methodology and design: A powerful tool for scientific data. *J Adv Med Dent Scie Res*, 2021; 9(11): 52-57. DOI: <https://doi.org/10.2176/jamdsr>

### Сведения об авторах

✉ Черник Кристина Николаевна – аспирант кафедры технологии композиционных материалов и древесиноведения, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», проспект им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660034, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1203-4825>, k.n.chernik@mail.ru.

Елисеев Сергей Геннадьевич – кандидат техн. наук, директор института лесных технологий, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», проспект им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660034, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>, s-555s@yandex.ru.

### Information about the authors

✉ Kristina N. Chernik – Post-Graduate Student, Department of Composite Materials Technology and Wood Science, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1203-4825>, k.n.chernik@mail.ru.

Sergey G. Eliseev – Candidate of Technical Sciences, Director of the Institute of Forest Technologies, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology 31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>, s-555s@yandex.ru.

✉ Для контактов | Corresponding auth



## Графо-аналитическое моделирование дискретно-непрерывных поточных линий лесопромышленных складов

Ирина М. Еналеева-Бандура<sup>1</sup>, [melnikov1978@inbox.ru](mailto:melnikov1978@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>

Дмитрий В. Лозовой<sup>1</sup>, [dv192@mail.ru](mailto:dv192@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0009-8414-8355>

Даниил Ю. Литвинов<sup>1</sup>, [chess96@mail.ru](mailto:chess96@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0008-8266-4092>

Александр Н. Баранов<sup>1</sup>, [aleksandr-baranov-55@mail.ru](mailto:aleksandr-baranov-55@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>

Владимир А. Морковин<sup>2</sup>, [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7613-3641>

Ольга А. Куницкая<sup>3</sup>, [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км, 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация

В данной статье рассматривается разработка графо-аналитического метода моделирования технологических процессов дискретно-непрерывных поточных линий лесопромышленных складов. Предложенный подход основан на матричных преобразованиях координат и позволяет аналитически описывать структуру технологических операций с визуализацией в виде графиков зависимости перемещений от времени. Авторами выделены два ключевых способа моделирования: суммирование векторов перемещений и суммирование частных значений времени, из которых первый является более эффективным для продольной подачи древесного сырья. Работа акцентирует внимание на текущих проблемах проектирования поточных линий, исторически сложившихся методах, а также преимуществах графо-аналитического подхода над традиционными способами. Целью исследования является разработка структурированного метода моделирования технологических процессов для совершенствования проектирования и оптимизации поточных линий лесопромышленных складов. Методы исследования включают теоретическое моделирование, аналитическое описание процессов на основе матричных преобразований и графическое отображение результатов. Результаты: Предложен новый метод моделирования, который позволяет упрощать процесс проектирования складской инфраструктуры и повышать его точность. Методика демонстрирует свою эффективность при моделировании работы продольных линий подачи древесного сырья. Область применения: Разработанный подход ориентирован на использование в лесной промышленности, однако он может быть адаптирован и для других отраслей с аналогичными технологическими задачами. Заключение: Представленный метод моделирования позволяет оптимизировать проектирование поточных линий, сокращая время и финансовые затраты на экспериментальные разработки. Работа имеет научную и практическую значимость для развития понятия комплексного использования лесных ресурсов. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства».

**Ключевые слова:** графо-аналитическое моделирование, матричные преобразования, лесопромышленные склады, дискретно-непрерывные процессы, поточные линии.

**Финансирование:** часть материалов исследования получена за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Еналеева-Бандура И.М. Графо – аналитическое моделирование дискретно – непрерывных поточных линий лесопромышленных складов / И.А. Еналеева-Бандура, Д.В. Лозовой, Д.Ю. Литвинов,

А.Н. Баранов, В.А. Морковин, О.А. Куницкая// Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 154-166. – Библиогр.: с. 162-165 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/10>

*Поступила* 28.12.2024. *Пересмотрена* 23.02.2025. *Принята* 11.03.2025. *Опубликована онлайн* 24.03.2025

*Article*

## Grapho-analytical modeling of discrete-continuous production lines of timber warehouses

**Irina M. Enaleeva-Bandura**<sup>1</sup>, [melnikov1978@inbox.ru](mailto:melnikov1978@inbox.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>

**Dmitry V. Lozovoy**<sup>1</sup>, [dvl92@mail.ru](mailto:dvl92@mail.ru),  <https://orcid.org/0009-0009-8414-8355>

**Daniel Yu. Litvinov**<sup>1</sup>, [chess96@mail.ru](mailto:chess96@mail.ru),  <https://orcid.org/0009-0008-8266-4092>

**Alexander N. Baranov**<sup>1</sup>, [aleksandr-baranov-55@mail.ru](mailto:aleksandr-baranov-55@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>

**Vladimir A. Morkovin**<sup>2</sup>,  [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

**Olga A. Kunitskaya**<sup>3</sup>, [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>

<sup>1</sup> *Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk Worker newspaper ave., 31, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 8 Timiryazeva str., Voronezh, Voronezh Region, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Arctic State Agrotechnological University, Russia, Yakutsk, Sergelyakhscoe highway, 3 km, d 3, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation*

### Abstract

This article discusses the development of a grapho-analytical method for modeling technological processes of discrete-continuous production lines of timber warehouses. The proposed approach is based on matrix transformations of coordinates and allows us to analytically describe the structure of technological operations with visualization in the form of graphs of displacement versus time. The authors have identified two key modeling methods: summation of displacement vectors and summation of particular time values, of which the first is more effective for longitudinal feeding of wood raw materials. The work focuses on the current problems of production line design, historically established methods, as well as the advantages of the grapho-analytical approach over traditional methods. The purpose of the research is to develop a structured method for modeling technological processes to improve the design and optimization of production lines of timber warehouses. The research methods include theoretical modeling, analytical description of processes based on matrix transformations and graphical representation of the results. Results: A new modeling method is proposed that makes it possible to simplify the process of designing warehouse infrastructure and increase its accuracy. The technique demonstrates its effectiveness in modeling the operation of longitudinal feed lines for wood raw materials. Scope of application: The developed approach is focused on use in the forestry industry, but it can be adapted to other industries with similar technological challenges. Conclusion: The presented modeling method makes it possible to optimize the design of production lines, reducing the time and financial costs of experimental development. The work has scientific and practical significance for the development of the concept of integrated use of forest resources. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry".

**Keywords:** graph-analytical modeling, matrix transformations, timber warehouses, discrete-continuous processes, production lines.

**Funding:** some of the research materials were obtained through a grant from the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

**Acknowledgments:** authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declares no conflict of interest.

**For citation:** Enaleeva-Bandura I.M., Lozovoy D.V, Litvinov D.Y., Baranov A.N., Morkovin V.A., Kunitskaya O.A. (2025) Grapho-analytical modeling of discrete continuous production lines of timber warehouses. *Forestry Engineering journal*, Vol. 15. No. 1 (57), pp. 154-166 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/10>

**Received** 28.12.2024. **Revised** 23.02.2025. **Accepted** 11.03.2025. **Published online** 24.03.2025

## Введение

Во времена СССР в нашей стране доминировала хлыстовая заготовка древесины, которая предусматривала вывозку с лесосек на лесопромышленные склады древесного сырья в виде хлыстов, реже деревьев, или полухлыстов. Также была разработана технология заготовки и вывозки древесного сырья в виде полудеревьев, но в производственный процесс лесозаготовительных предприятий она не была внедрена [1, 2].

После крушения СССР отечественное лесное машиностроение, ориентированное на выпуск лесных машин для хлыстовой заготовки древесины – валочно-трелевочных, валочно-пакетирующих, также было развалено. На лесозаготовительных предприятиях России начали доминировать системы машин для сортиментной заготовки древесины, прежде всего харвестеры и форвардеры, реже встречаются форвестеры и харвардеры, валочно-трелевочно-процессорные машины [3]. На ряде крупных предприятий Сибири сортименты получают на верхних складах, при помощи процессоров.

Доминирование сортиментной заготовки привело к тому, что такой вид лесопромышленных складов как нижние склады лесозаготовительных предприятий также стали редкостью. Ведь именно на них ранее производили первичную обработку заготовленного древесного сырья – раскряжевку и сортировку, реже обрезку сучьев, раскряжевку и сортировку [4].

С одной стороны, сортиментная древесины заготовка доминирует во всем мире. Она позволяет, отказавшись от промежуточных (нижних) лесопромышленных складов, доставлять сортименты различных групп сортировки – породы, размеров, качества, назначения, непосредственно на биржи сырья потребителей, или лесоперевалочные базы.

С другой стороны, производство сортиментов на лесосеке, при котором очистка деревьев от сучьев, раскряжевка и сортировка выполняются машинами и оборудованием с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) повышает энергоемкость технологического процесса лесосечных работ, поскольку КПД ДВС значительно ниже, чем у электродвигателей привода стационарных сучкорезных, раскряжевочных, сучкорезно-раскряжевочных установок, и сортировочных транспортеров [5].

Кроме того, оптимальность раскряга при раскряжке на лесосеке значительно меньше, чем при раскряжке на стационарных раскряжевочных установках лесопромышленных складов, что заметно снижает процент выхода деловой древесины в целом, а также процент выхода целевых сортиментов [6].

Поэтому можно в настоящее время наблюдать процессы отказа крупных лесопромышленных предприятий Сибири, имеющих возможность осуществлять транспортировку заготовленных хлыстов по собственным лесовозным дорогам, или водным транспортом, в плотях, от сортиментной заготовки и возврата к хлыстовой. При этом их собственные лесопромышленные склады оснащаются импортными (из недружественных стран) раскряжевно-сортировочными линиями.

Несмотря на то, что вывозить заготовленную древесину из леса в виде деревьев с кроной не выгодно ввиду малого коэффициента полндревесности ввоза, по мере развития технологий переработки кроновой части деревьев с получением востребованной, высокомаржинальной продукции, и подорожанием древесного сырья в целом, этот вариант технологического процесса лесосечных работ также начинает становиться востребованным, вкуче с апробациями технологии заготовки полудеревьями, при которой комлевая и срединная часть хлыста, в виде делового

долготья вывозятся на нижние лесопромышленные склады отдельно, а вершинная часть дерева с кроной отдельно. При этом для повышения коэффициента полндревесности веза последних можно обеспечить их принудительное уплотнение при погрузке и перевозке [7].

Следовательно, при рассмотрении вариантов возрождения в России производства агрегатов поточных линий нижних лесопромышленных складов от идеи стационарных сучкорезных, или сучкорезно-раскряжевочных установок отказываться рано.

Первичная обработка древесного сырья в виде хлыстов, полухлыстов, деревьев на лесопромышленных складах осуществляется, обычно, на линиях с продольной подачей, с последовательным или смешанным агрегатированием под раскряжевочную пилу, система ИНС. Или с поперечной подачей - с поперечным надвиганием на постав дисковых пил (раскряжевочные установки типа слешер, триммер), система ЗНС. Также были разработаны и ограничено внедрены на крупных лесопромышленных складах линии, предусматривающие групповую (пачковую) обработку деревьев или хлыстов, система ЗНС, на установках типа МСГ-3, МСГ-3.1, ЛО-62 [4, 6, 8, 9]. Выбор типа раскряжевочной поточной линии зависит от годового грузооборота конкретного предприятия. Очевидно, что новые условия применения цифровой автоматизации требуют создания нового поколения раскряжевочных поточных линий, которые будут отвечать требованиям по ресурсосбережению, производительности, энергоемкости и др. Изучение литературных источников показало, что оборудование для первичной обработки древесного сырья на лесопромышленных складах в Российской Федерации в настоящее время серийно не выпускается. Изготавливается мелкосерийное оборудование без учета региональных условий арендных баз, например, таксационных и качественных характеристик произрастающих на них древостоев [10, 11]. В то время как до девяностых годов XX века в нашей стране выпускались поточные линии с продольной подачей типа хлыста, включавшие в себя стационарные сучкорезные, раскряжевочные, сучкорезно-раскряжевочные установки,

ПСЛ-2А, ЛО-15С, ЛО-30, и др. конструкция которых учитывала региональные особенности как климатические (линии в северном исполнении), так и таксационные - по крупности и качеству древесного сырья. Естественно, возобновлять выпуск морально устаревшего оборудования не рационально, необходимо совершенствовать конструкции агрегатов и оборудования, входящих в структуры различных поточных линий. Необходимо разработать метод моделирования поточных линий с последовательным размещением оборудования и агрегатов в количестве более двух, что позволит внедрять оборудование с минимальным количеством доработок. Именно такую последовательность структуры поточных линий современные методы моделирования не решают [4, 12]. Моделирование ведется методом циклограмм при очень слабой формализации технологического процесса [12]. Многие критерии оценки можно получить только экспериментальным путем, что очень дорого. Существующие методы моделирования поточных технологий на основе теории массового обслуживания, PDE метода (описание процесса уравнениями в частных производных [13, 14], вероятностные методы, не решают проблему, поскольку также приводят в лучшем случае к циклограммам (учитывают) два параметра (время и безразмерную величину). То есть, даже наиболее совершенный метод решения проблемы PDE [12-15] решает задачу в двухмерной области. Решение сводится к циклограммам в формате 2D [15]. Изложенный ниже метод матричных преобразований координат решает проблему поточных технологий с последовательно установленным оборудованием более двух единиц в формате 4D плюс. То есть, метод позволяет учитывать структуру поточной линии при последовательных или одновременных перемещениях по координатным осям X, Y, Z с учетом частных значений времени перемещений по отдельным агрегатам. Для этого применяются матрицы 5×5 [16]. При этом имеется возможность учитывать любую операцию, на любом станке (установке, агрегате), если имеются затраты времени на выполнение операции.

**Цель данной работы:** разработать метод моделирования работы оборудования поточных линий лесопромышленных складов, дающий возможность

варьировать факторами изменчивости параметров предмета труда, скорости перемещения, времени работы инструмента с немедленным получением отклика моделирующей системы на следующей последовательности обработки предмета труда, а также определять степень совмещенности операций и задержек.

### Объекты и методы исследования

Технологические операции на поточных линиях лесопромышленных складов выполняются в строгой последовательности непрерывно или непрерывно–циклически в зависимости от характера операции обработки. В первом случае поступление сырья и выход готовой продукции (полуфабриката) осуществляется непрерывно с коррекцией режимов выполнения операций в автоматическом режиме управления поточной линией [4]. Во втором случае при выполнении ряда операций в какой-то момент общего цикла производится ряд операций без перемещения предмета труда, например, раскряжевка на сортименты. Или выполняется операция сбрасывания предмета труда. В этих случаях также имеется возможность учесть затраты времени. Нами разработаны два метода графического решения. Первый метод - суммирование векторов перемещений, который больше подходит для поточных линий с продольной подачей хлыстов, или деревьев. Второй – метод суммирования частных значений времени по операционно – метод для поточных линий с поперечной подачей. Рассмотрим графический метод моделирования технологического процесса для поточных линий с продольной подачей в непрерывном режиме.

Для примера произведем описание упрощенной поточной системы - сучкорезной установки, состоящей из трех видов оборудования, которые выполняют следующие операции:

- А - разобшение пакета деревьев;
- В – протаскивание сучковой зоны;
- С – удаление древесного хлыста.

Структуру процесса опишем графом - А, В, С - вершины графа (рисунок 1), -  $l_1, l_2, l_3$  ребра графа; D - операция складирования.

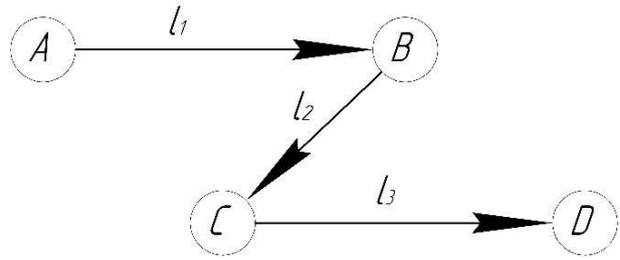


Рисунок 1. Граф технологического процесса  
Figure 1. Graph of the technological process

В соответствии с рисунком 2 произведем моделирование технологического процесса последовательно установленного оборудования поточной линии, состоящей из трех агрегатов:

- Разобщик пакета деревьев (вектор  $l_1$ );
- протаскивающая каретка для обрезки сучьев (вектор  $l_2$ );
- агрегат удаления древесных хлыстов (вектор  $l_3$ ).

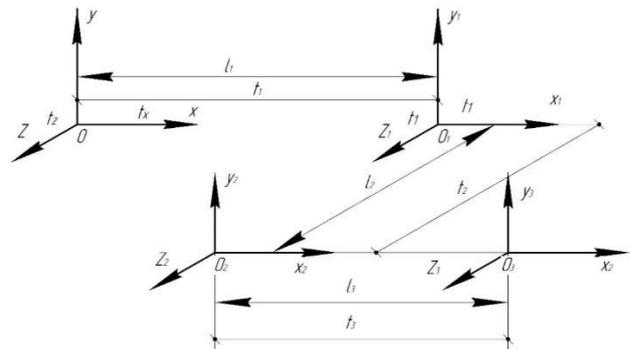


Рисунок 2. Матричные преобразования координат: OXYZ - базовая система координат присваивается предмету труда, поступившему на операцию разобшения пакета;  $O_1 X_1 Y_1 Z_1, O_2 X_2 Y_2 Z_2, O_3 X_3 Y_3 Z_3$  – координатные системы соответствующие операциям разобшения пакета деревьев, протаскивания сучковой зоны, удаления древесного хлыста;  $l_1, l_2, l_3$  модули векторов перемещений при разобшении пакета деревьев, протаскивании сучковой зоны деревьев, удаления из зоны обработки соответственно;  $t_1, t_2, t_3$  частные значения времени выполнения операций разобшения, протаскивания, удаления  $l_1, l_2, l_3$  соответственно

Figure 2. Matrix transformations of coordinates: OXYZ - the basic coordinate system is assigned to the object of labor received for the package separation op-

eration;  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ ,  $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ ,  $O_3 X_3 Y_3 Z_3$  – coordinate systems corresponding to the operations of separating a package of trees, dragging a knot zone, removing a tree whip;  $l_1, l_2, l_3$  modules of displacement vectors when disconnecting a package of trees, dragging the knot zone of trees, removal from the processing zone, respectively;  $t_1, t_2, t_3$  are particular values of the execution time of the operations of separation, dragging, deletion  $l_1, l_2, l_3$ , respectively

На рис. 1 видно, что в основе модели лежит суммирование векторов  $|\vec{l}_1|, |\vec{l}_2|, |\vec{l}_3|$ . Сумма модулей векторов  $|\vec{l}_1| + |\vec{l}_2| + |\vec{l}_3| = \sum_i^n l_i$  соответствует итоговому перемещению предмета труда относительно плавающей базовой системы координат OXYZ. Каждому перемещению в процессе обработки дерева соответствует частное значение времени  $t_1, t_2, t_3$ , которое при выполнении операции одинаково для перемещений в направлении любой координатной оси, то есть время изменяется под каждой осью при выполнении  $i$ -той операции одинаково. Это обстоятельство позволяет поворачивать векторы на осях (рисунок 2) и переносить параллельно, поскольку преобразование координат не влияет на параметры векторов [17, 18], а частное значение времени протекания операции одинаково по каждой оси координат.

Каждой координатной системе  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ ,  $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ ,  $O_3 X_3 Y_3 Z_3$  (рисунок 2) соответствует переходная ортогональная единичная квадратная матрица  $5 \times 5$  [31, 32]

$$M_0 = m_0(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}; 0, 0, 0) \times m_1(\vec{i}, t_1, |\vec{l}_1|, t_1) \times m_2(\vec{j}, t_2, |\vec{l}_2|, t_2) \times m_3(\vec{k}, t_3, |\vec{l}_3|, t_3).$$

В сокращенной записи [31, 32]. В развернутой форме сумма перемещений по трем координатам будет иметь следующий вид:

$$M_3 = m_1(\vec{i}, t_1, l_1) \times m_2(\vec{k}, t_2, l_2, t_2) \times m_3(\vec{i}, t_3, l_3, t_3)$$

$$M_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 + l_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & t_1 + t_2 + t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Результирующая матрица  $M_3$  указывает на координаты предмета труда относительно плавающей системы координат OXYZ (рисунок 2), также дает суммарный результат по затраченному времени на технологический процесс, то есть сформирована единая ось времени, которая состоит из суммы частных значений времени, затрачиваемых на операции. Таким образом матрица  $5 \times 5$  имеет графическое соответствие – это вектор, например,  $\vec{l}_1$ , исходящий из начала координат системы  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ . Координаты вектора  $x=l_1, y=0, z=0$ , время перемещения или выполнения операции равно  $t_1$ . Ось частного значения времени  $t_1$  также исходит из начала координат и имеет положительное значение. Для синтеза модели необходимы следующие параметры: скорости перемещения, расстояния перемещений, частное время перемещений предмета труда на каждом из агрегатов. Эти параметры можно определить тремя путями [19]:

- исходя из необходимой производительности поточной линии определяется цикл  $t_{ци}$  ведущего агрегата;
- решается задача определения параметров агрегатов идеальной поточной линии при помощи матриц  $4 \times 4$  [20];
- назначаются параметры оборудования поточной последовательности по аналогии с апробированными и надежными агрегатами в промышленном исполнении.

### Результаты и их обсуждение

Проведем анализ работы модели на конкретном примере. Назначим параметры трех-агрегатной поточной линии при одинаковых частных значениях времени  $t_i$ , что позволит синтезировать идеальную модель [21] технологического процесса. Идеальная модель не имеет задержек и остановок непрерывного потока предмета труда, циклы станков равны циклу задающего механизма. Главная задача моделирования поточных технологий заключается в изучении технологического процесса при совмещении операций, то есть, моделируется работа поточных линий с последовательно установленным оборудованием в количестве больше двух в непрерывном режиме.

Проследим выполнение условия совмещения операций на модели сучкорезной установки рисунок

3. От нулевой точки оси времени начинается график перемещения дерева при разобшении – вектор  $l_1 = 1,6$  м. (Iст - Iхл). На восьмой секунде (масштаб: в пяти мм одна секунда) происходит переход от операции разобщения к операции протаскивания. Переход мгновенный. Все сопутствующие переходные процессы по умолчанию укладываются в интервал восьми секунд.

Суммируем векторы  $l_1, l_2, l_3$  по правилам векторной алгебры и используем возможность параллельного переноса вектора на величину равную частному значению времени, в результате получаем график зависимости перемещений от времени по каждой операции.

Далее начинается процесс протаскивания дерева через сучкорезную головку  $l_2 = 3$  м,  $t_2 = 8$  с. (IIст. – IIхл) Одновременно с этим начинается разобщение пакета деревьев (IIхл- Iст), которое заканчивается одновременно с процессом протаскивания. Процесс протаскивания (Iхл – IIст) заканчивается переходом на станок (IIIст), который удаляет хлыст из зоны обрезки сучьев (Iхл -IIIст) и т.д.

Дальнейший анализ сводится к определению совмещённых операций следующим образом (рисунок 3): проводим мысленно сечение в виде вертикальной черты по первому графику зависимости перемещений от времени на третьей секунде протекающего технологического процесса (рисунок 3). В сечении попал только график первого станка (Iст). Из точки пересечения наклонной линии графика (проводим горизонтальную линию до пересечения вектора  $l_1$ . Общая длина пути 3 м, за три секунды предмет труда прошел один метр (масштаб: пяти мм на рисунке соответствует 1 м), то есть получаем информацию, где находится первый предмет труда.

Сделаем сечение на десятой секунде: второй хлыст (Iст - IIхл) при разобщении прошел 0,8 метра, первый хлыст (Iхл-IIст) находится в процессе обрезки сучьев (обрезано по длине сучковой зоны 1,5 м.). Сечение на двадцатой секунде – третий хлыст (Iст-IIIхл) в процессе разобщения прошел 1,5 м; со второго хлыста обрезано сучьев на длине 3 м; первый хлыст (Iхл-IIIст) находится в процессе удаления хлыста из зоны обрезки сучьев и находится от зоны на расстоянии 2 м. Далее, на тридцатой секунде по-

лучим следующую информацию: четвертый предмет труда находится в процессе разобщения и прошел 2,2 м; на третьем дереве обрезано сучьев на длине 4,3 м. Второй хлыст находится на расстоянии 3 м от зоны обрезки сучьев. Цикл обработки одного хлыста равен  $t_{ц} = 24$  с.

На рисунке 4 приведена графическая модель поточной линии аналогичной, рассмотренной выше, но с буферным магазином после разобщителя. Магазин поставлен для упрощения модели. Поскольку цикл разобщителя намного меньше, чем циклы последующих операций и при моделировании модель будет перегружена для восприятия. На рисунке 4 с буферным магазином задержки происходят только для второго станка, что облегчает анализ в демонстрационных целях.

Проведем анализ по сечениям: сечение М- М Третий хлыст в процессе разобщения прошел путь в пределах 1,75 м на 16 секунде. Второй хлыст прошел 1,75 м при протаскивании на 16 секунде работы линии. Сечение N-N на 24 секунде. Четвертый хлыст прошел двухметровый путь. Третий хлыст также прошел 2 м пути протаскивания. Первый хлыст находится на 2,5 м от точки перехода при удалении первого хлыста. Завершится переход удаления первого хлыста на 27 с, то есть второй хлыст необходимо задержать на 1,5 с чтобы перейти на агрегат удаления хлыста из зоны обработки. Далее видно, что третий хлыст надо задержать на 3 с, четвертый хлыст на 4 с и т.д. по нарастающей. То есть в какой-то момент необходимо будет скорректировать скоростные характеристики станков с целью исключения простоев одного или двух агрегатов.

Дальнейший анализ показывает (рис. 2), что рассмотренный метод моделирования определяет три параметра перемещений по трем координатам X, Y, Z с учетом частных значений времени, затрачиваемого на перемещения или другие технологические операции, которые можно учесть по затратам времени. Плюс к четырем параметрам - определение скорости как тангенс угла ( $\varphi$ ) между осью времени и диагональю треугольника графика зависимости перемещений от времени (рис. 4).

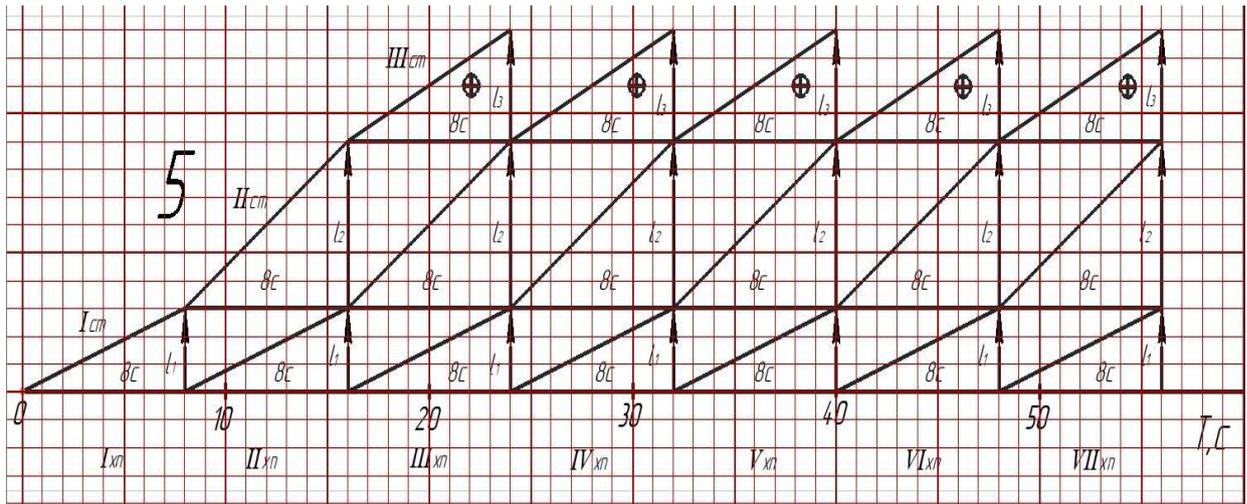


Рисунок 3. Матричная графическая модель идеальной поточной линии для обрезки сучьев (аналитическая запись структуры):

$l_1 = 3\text{м}, t_1 = 8\text{с.}$  (разобшитель пакетов деревьев);  $l_2 = 6\text{м}, t_2 = 8\text{с.}$  (протаскивание сучковой зоны дерева);  $l_3 = 4\text{м}, t_3 = 8\text{с.}$  (удаление древесного хлыста из зоны обрезки сучьев).  $t_1 = t_2 = t_3 = t_{ц}$ ; Iст, IIст, IIIст – первый станок, второй станок, третий станок соответственно. I хл, II хл и т.д. – первый хлыст, второй хлыст и т.д.; Т с – ось времени, секунды

Figure 3. Matrix graphical model of an ideal production line for cutting branches (analytical record of the structure):

$l_1=3\text{m}, t_1=8\text{s.}$  (tree packet disconnecter);  $l_2=6\text{m}, t_2=8\text{s.}$  (dragging the knot zone of the tree);  $l_3=4\text{m}, t_3=8\text{s.}$  (removing the wood whip from the branch pruning area).  $t_1=t_2=t_3=t_{ц}$ ; Iст, IIст, IIIст – the first machine, the second machine, the third machine, respectively. Iхл, IIхл, etc. – the first whip, the second whip, etc.; Т с - is the time axis, seconds

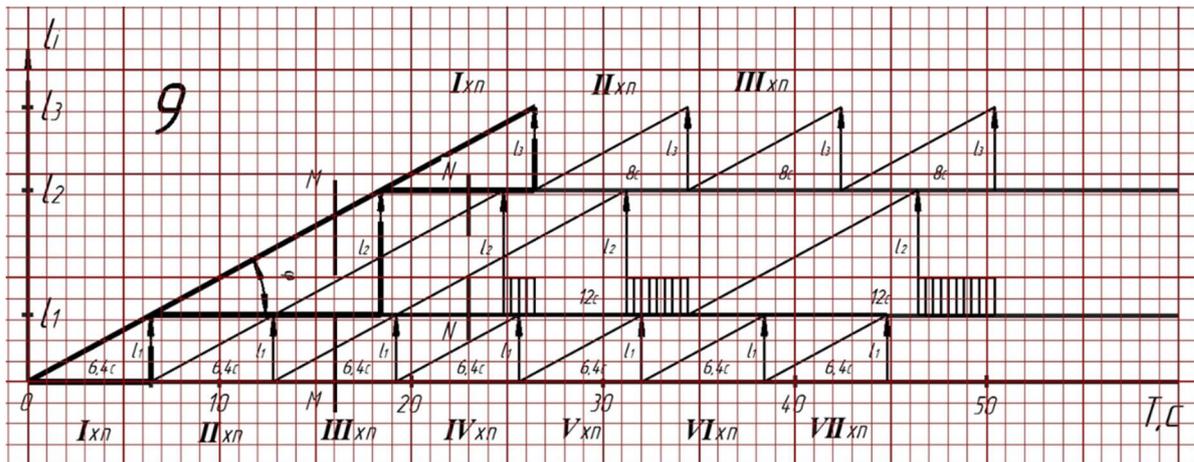


Рисунок 4. Матричная модель трех-агрегатной поточной линии для обрезки сучьев в графическом исполнении с параметрами по аналогам:

$l_1 = 1,6\text{м}, t_1 = 6,4\text{с.}$  (разобшитель пакетов деревьев);  $l_2 = 3\text{м}, t_2 = 12\text{с.}$  (протаскивание сучковой зоны)  $l_3 = 2\text{м}, t_3 = 8\text{с}$  агрегат удаления хлыста из зоны обрезки сучьев.;  $\varphi$  - угол наклона графика зависимости перемещений от времени

Figure 4. Matrix model of a three-unit production line for pruning branches in graphical design with analog parameters:  $l_1=1,6\text{m}, t_1=6.4\text{s.}$  (disconnecter of tree packages);  $l_2=3\text{m}, t_2=12\text{s.}$  (dragging the knot zone);  $l_3=2\text{m}, t_3=8\text{s}$  the unit for removing the whip from the area of pruning branches.;  $\varphi$  - is the angle of inclination of the graph of the dependence of movements on time

Тангенс угла  $\varphi$  равен скорости перемещения предмета труда на данном агрегате. Рассмотренный способ моделирования «суммированием векторов» матричного метода моделирования в большей степени подходит для дискретно – циклических поточных линий (продольная подача хлыстов), поскольку расстояния перемещений (векторы) совпадают с размерными характеристиками предмета труда (хлыстов) и продукта труда (сортиментов). Эта особенность позволяет в большей степени учитывать требования по оптимизации раскроя древесного сырья. В дальнейшем в теоретических разработках следует рассмотреть варианты моделирования технологического процесса дискретно – непрерывного и дискретно – циклического типа с размещением графиков зависимости на оси времени.

### Заключение

Новый метод моделирования с применением матричных преобразований координат решает проблему моделирования поточных технологий в формате 4D плюс с расширенными возможностями формализации технологического процесса в виде описания структуры матрицами  $5 \times 5$  в сокращенной записи или в развернутой форме матриц. Обе формы записи достаточно информативны. Каждое оборудование, в составе поточной линии лесопромышленного склада определяется естественными параметрами, характеризующими технологический процесс – время в явном виде, направление перемещений в пространстве, скорость перемещения и все это в естественных размерных единицах. Структурный анализ, предваряющий процесс моделирования, проводится в процессе подготовки исходных данных. Каждая матрица в структурной записи технологического процесса обработки предмета труда

имеет графическое соответствие в виде графика зависимости перемещений от времени. Аналитическая и графическая части моделирования технологического процесса лесопромышленного склада позволяют учесть затраты времени любых технологических операций.

Рассмотренные в статье фрагменты графической модели для трех станков (агрегатов, установок) ограничены по числу обработанных древесных хлыстов форматом страницы. В общем случае этот фактор бесконечен. При этом имеется возможность варьировать факторами изменчивости параметров предмета труда, скорости перемещения, времени работы инструмента с немедленным получением отклика моделирующей системы на следующей последовательности обработки предмета труда. Графическая модель позволяет определять степень совмещенности операций и задержек, особенно при непрерывном методе обработки предмета труда. Разработанный метод моделирования предназначен прежде всего для разработчиков лесной техники первичной обработки и частичной переработки древесного сырья. В дальнейшем требуется дополнить созданные основы моделирования методом моделирования поточных линий с поперечной подачей.

Принципиально, предложенная методика может быть также адаптирована для использования при моделировании технологических потоков лесных терминалов – непостоянных лесопромышленных складов, типа 4НС, древесно-подготовительных цехов деревоперерабатывающих предприятий, основных лесосечных работ, лесовосстановительных работ (искусственное лесовосстановление) и выращивания посадочного материала [22, 23].

### Список литературы

1. Григорьев И.В., Григорьева О.И., Никифорова А.И., Глуховский В.М. Перспективные направления развития технологических процессов лесосечных работ // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2016. № 2 (184). С. 109-116.
2. Тихонов И.И., Григорьев И.В. Технологический процесс лесосечных работ при вывозке древесины полудеревьями // Материалы шестой всероссийской научно-технической конференции «Вузовская наука - региону». Вологда: ВоГТУ, 2008. - Т.1. - С.188-189.
3. Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Перспективная техника для проведения рубок ухода за лесом // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. материалы научно-технической конференции. 2016. С. 112-114.

4. Пятакин В.И., Редькин А.К., Базаров С.М., Бирман А.Р., Бит Ю.А., Григорьев И.В., Шадрин А.А., Чемоданов А.Н. Технология и оборудование лесных складов и лесообрабатывающих цехов: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 656300 Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств по специальности 250401 Лесоинженерное дело / Москва, Издательство: Московский государственный университет леса - 2008. - 384 с
5. Александров И.К., Григорьев И.В., Иванов В.А., Елизаров Ю.М., Чуднов Ю.Н. Методика определения топливной экономичности бензомоторных пил // Вестник КрасГАУ. 2010. № 2 (41). С. 112-117.
6. Куницкая О.А., Тихонов И.И., Куницкая Д.Е., Григорьев И.В., Земцовский А.Е. Оптимизация процесса раскряжевки хлыстов на лесоперевалочных базах лесных холдингов при выпилровке сырья для мачтопропиточных заводов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. № 3 (339). С. 86-93.
7. Тихонов И.И., Григорьев И.В., Никифорова А.И., Григорьева О.И. Лесовозный транспорт. Патент на полезную модель RU 119206 U1, 20.08.2012. Заявка № 2012120320/13 от 17.05.2012.
8. Рябухин П.Б., Григорьев И.В., Трушевский П.В., Курочкин П.А., Охлопкова М.К., Жук А.Ю. Постановка задачи поиска оптимальных параметров конструкции установки для групповой раскряжевки пачек порубочных остатков // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 130-137.
9. Рябухин П.Б., Григорьев И.В. Определение натяжения несущего каната гибкого режущего органа в процессе работы установки для пачковой раскряжевки // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 4 (52). С. 63-72.
10. Grigorieva O.I., Runova E.M., Tikhonov E.A., Storodubtseva T.N., Druzyanova V.P., Gerts E.F., Garus I.A., Grigorev I.V. Dynamics of the taxation characteristics of forest stands in the North-West of Russia // Polish Journal of Environmental Studies. 2022. Т. 31. № 5. С. 4107-4115.
11. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Shadrina S., Grigorev I. Influence of different forest management techniques on the quality of wood // Journal of Renewable Materials. 2021. Т. 9. № 12. С. 2175-2188.
12. Сердюк А.И., Рахматуллин Р.Р., Зеленин А.П. Метод циклограмм в исследовании гибких производственных ячеек. модели и алгоритмы: монография – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. – 208 с.
13. Коробецкий Ю.П., Рамазанов С.К. Имитационные модели в гибких – Луганск: Изд. ВНУ, 2003. – 280 с.
14. Пигнастый О.М. Основы статистической теории построения непрерывных моделей производственных линий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Математика. 2014. С. 3-12.
15. Пигнастый О.М., Заруба В.Я. Континуальное моделирование производства на поточных линиях // Мультиконференция по проблемам управления: тезисы докладов 6-ой Всероссийской научно-практической конференции (МКПУ-2013), (Дивноморье, 30 сентября-5 октября 2013 г.). - Ростов -на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2013. Том. 3 - С. 157-161.
16. Denavit J., Hartenberg R.S. A Kinematic Notation for lower Pair Mechanisms Based on Matrices // Journal of Applied Mechanics, vol.22,trans.ASME,vol.77,series E.,1955, pp.215-221.
17. Акивис М.А. Тензорное исчисление –Изд –во «Наука» , 1972. – 325 с.
18. Воробьев Е.И., Попов С.А., Шевелева Г.И. Механика промышленных роботов: в 3 кн. Кн. 1. Кинематика и динамика – М.: Высш. шк., 1988. – 304 с.
19. Крейнин, Г. В. Кинематика, динамика и точность механизмов – Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
20. Лозовой, В. А. Матричное преобразование координат применительно к структурному анализу раскряжечных линий // Лесозаготовка: межвуз. сб. научн. тр. – Красноярск: СибГТУ, 1998. С. 133-139.
21. Лозовой В.А., Никончук М.Ю., Литвинов Д.Ю. Концепция моделирования поточных технологий методом матричных преобразований координат // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40. № 6. С. 552-557.
22. Григорьев И.В., Куницкая Д.Е. Уменьшение количества отходов основного производства древесно-подготовительных цехов за счет автоматизации основных операций // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 2-2 (13-2). С. 409-412.

23. Григорьев И.В., Григорьева О.И. Постановка задачи экономической оценки улучшения условий труда и безопасности работы операторов лесных машин // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 4. С. 43-48.

### References

1. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Nikiforova A.I., Gluhovskij V.M. *Perspektivnye napravleniya razvitiya tekhnologicheskikh processov lesosechnyh rabot* [Promising directions for the development of technological processes of logging operations]. Trudy BGTU= Proceedings of BSTU. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost =Forestry and woodworking industry. 2016; 2(184):109-116. (in Rus)

2. Tihonov I.I., Grigor'ev I.V. *Tekhnologicheskij process lesosechnyh rabot pri vyvozke drevesiny poluderev'yami* [ Technological process of logging operations during the removal of wood by semitrees]. Materialy shestoj vsrossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Vuzovskaya nauka - regionu»= Materials of the sixth All-Russian scientific and technical conference "University Science for the region". Vologda: VoGTU, 2008; 1:188-189. (in Rus)

3. Grigor'eva O.I., Nguen F.Z. *Perspektivnaya tekhnika dlya provedeniya rubok uhoda za lesom* [Promising equipment for logging and forest maintenance]. Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie. materialy nauchno-tekhnicheskoy konferencii= Forests of Russia: politics, industry, science, education. materials of the scientific and technical conference. 2016;112-114. (in Rus)

4. Patyakin V.I., Red'kin A.K., Bazarov S.M., Birman A.R., Bit Yu.A., Grigor'ev I.V., Shadrin A.A., Chemodanov A.N. *Tekhnologiya i oborudovanie lesnyh skladov i lesobrabatyvayushchih cekhov: uchebnik* [Technology and equipment of timber warehouses and woodworking shops: a textbook]. Moscow State University of Forests. 384 p. (in Rus)

5. Aleksandrov I.K., Grigor'ev I.V., Ivanov V.A., Elizarov Yu.M., Chudnov Yu.N. *Metodika opredeleniya toplivnoj ekonomichnosti benzomotornyh pil* [ Methodology for determining the fuel efficiency of gasoline-powered saws]. Vestnik KrasGAU= Bulletin of KrasGAU. 2010; 2 (41):112-117. (in Rus)

6. Kunickaya O.A., Tihonov I.I., Kunickaya D.E., Grigor'ev I.V., Zemcovskij A.E. *Optimizaciya processa raskryazhevki hlystov na lesoperevalochnyh bazah lesnyh holdingov pri vypilovke syr'ya dlya machtopropi-tochnyh zavodov* [Optimization of the process of buckling whips at timber processing bases of forest holdings when sawing raw materials for mast-feeding plants]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal = Forest magazine. 2014; 3 (339):86-93. (in Rus)

7. Tihonov I.I., Grigor'ev I.V., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I. Logging transport. Utility model patent RU 119206 U1, 08/20/2012. Application No. 2012120320/13 dated 05/17/2012 (in Rus)

8. Ryabuhin P.B., Grigor'ev I.V., Trushevskij P.V., Kurochkin P.A., Ohlopokova M.K., Zhuk A.Yu. *Postanovka zadachi poiska optimal'nyh parametrov konstrukcii ustanovki dlya gruppovoj raskryazhevki pachek porubochnyh ostatkov* [Formulation of the problem of finding optimal installation design parameters for group bucking of bundles of felling residues]. Sistemy. Metody. Tekhnologii =Systems. Methods. Technologies. 2024; 1 (61):130-137.

9. Ryabuhin P.B., Grigor'ev I.V. *Opredelenie natyazheniya nesushchego kanata gibkogo rezhushchego organa v processe raboty ustanovki dlya pachkovoju raskryazhevki* [Determination of the tension of the supporting rope of a flexible cutting body during operation of a pack bucking unit]. Sistemy. Metody. Tekhnologii =Systems. Methods. Technologies. 2021; 4 (52): 63-72. (in Rus)

10. Grigorieva O.I., Runova E.M., Tikhonov E.A., Storodubtseva T.N., Druzyanova V.P., Gerts E.F., Garus I.A., Grigo-rev I.V. Dynamics of the taxation characteristics of forest stands in the North-West of Russia. Polish Journal of Environmental Studies. 2022; 31 (5): 4107-4115.

11. Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Shadrina S., Grigorev I. Influence of different forest management techniques on the quality of wood. Journal of Renewable Materials. 2021;9 (12):2175-2188.

12. Serdyuk A.I., Rahmatullin R.R., Zelenin A.P. The cyclogram method in the study of flexible production cells. models and algorithms: a monograph. Orenburg: GO OSU, 2009. 208 p. (in Rus)

13. Korobeckij Yu.P., Ramazanov S.K. Simulation models in flexible systems. Lugansk: VNU Publishing House, 2003. 280 p. (in Rus)

14. Pignastyj O.M. *Osnovy statisticheskoy teorii postroeniya kontinual'nykh modelej proizvodstvennykh liniy* [Fundamentals of the statistical theory of building continuous models of production lines] *Vostochno-Evropskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. Matematika* = East European Journal of Advanced Technologies. Mathematics. 2014; 3-12. (in Rus)
15. Pignastyj O.M., Zaruba V.Ya. *Kontinual'noe modelirovanie proizvodstva na potochnykh liniyah* [Continuous modeling of production on production lines] *Mul'tikonferenciya po problemam upravleniya: tezisy dokladov 6-oj Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii (MKPU-2013), (Divnomor'e, 30 sentyabrya-5 oktyabrya 2013 g.)* = Multi-conference on management problems: abstracts of the 6th All-Russian Scientific and Practical Conference (MCPU-2013), (Divnomorye, September 30-October 5, 2013). Rostov-on-Don: Publishing House Southern Federal University, 2013. 3: 157-161. (in Rus)
16. Denavit J., Hartenberg R.S. A Kinematic Notation for lower Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics*. 1955; 22 (77):215-221.
17. Akivis M.A. *Tensor Calculus*. Nauka Publishing House, 1972, 325 p. (in Rus)
18. Vorob'ev E.I., Popov S.A., Sheveleva G.I. *Mechanics of industrial robots: in 3 books. Book 1. Kinematics and dynamics*. M.: Higher School, 1988. 304 p. (in Rus)
19. Kreinin, G.V. *Kinematics, dynamics and precision of mechanisms – A reference book*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1984. 224 p. (in Rus)
20. Lozovoj, V.A. *Matrichnoe preobrazovanie koordinat primenitel'no k strukturnomu analizu raskryazhevochnykh liniy* [Matrix transformation of coordinates in relation to the structural analysis of bucking lines]. *Lesoeksploatatsiya: mezhvuz. sb. nauchn. tr.* = Forest exploitation: interuniversity collection of scientific tr. – Krasnoyarsk: SibGTU, 1998. PP 133-139. (in Rus)
21. Lozovoj V.A., Nikonchuk M.Yu., Litvinov D.Yu. *Koncepciya modelirovaniya potochnykh tekhnologij metodom matrichnykh preobrazovaniy koordinat* [The concept of modeling flow technologies using matrix coordinate transformations]. *Hvoynye boreal'noj zony* = Conifers of the boreal zone. 2022; 40 (6): 552-557. (in Rus)
22. Grigor'ev I.V., Kunickaya D.E. *Umen'shenie kolichestva othodov osnovnogo proizvodstva drevesno-podgotovitel'nykh cekhov za schet avtomatizacii osnovnykh operacij* [Reduction of the amount of waste from the main production of wood preparation shops due to automation of basic operations] *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* = Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015; 3((2-2 (13-2)): 409-412. (in Rus)
23. Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. *Postanovka zadachi ekonomicheskoy ocenki uluchsheniya uslovij truda i bezopasnosti raboty operatorov lesnykh mashin* [Setting the task of economic assessment of improving working conditions and safety of operators of forest machinery]. *Bezopasnost' i ohrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvah* = Occupational safety and health in logging and woodworking industries. 2022; 4:43-48. (in Rus)

### Сведения об авторах

*Еналеева-Бандура Ирина Михайловна* - доктор технических наук, доцент кафедры лесного инжиниринга, институт лесных технологий ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, e-mail: [melnikov1978@inbox.ru](mailto:melnikov1978@inbox.ru).

*Лозовой Дмитрий Владимирович* - аспирант ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8414-8355>, e-mail: [dv192@mail.ru](mailto:dv192@mail.ru)

*Литвинов Даниил Юрьевич* – аспирант ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8266-4092>, e-mail: [r0009-0008-8266-4092](mailto:r0009-0008-8266-4092)

*Баранов Александр Николаевич* - кандидат технических наук, доцент кафедры лесного инжиниринга, институт лесных технологий ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева», г. Красноярск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>, e-mail: [aleksandr-baranov-55@mail.ru](mailto:aleksandr-baranov-55@mail.ru)

✉ *Морковин Владимир Александрович* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru)

*Куницкая Ольга Анатольевна* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru).

### Information about the authors

*Irina M. Enaleeva-Bandura* - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Forest Engineering, Institute of Forest Technologies, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, e-mail: [melnikov1978@inbox.ru](mailto:melnikov1978@inbox.ru).

*Dmitry V. Lozovoy* - postgraduate student of the Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8414-8355>, e-mail: [dvl92@mail.ru](mailto:dvl92@mail.ru)

*Daniil Yu. Litvinov* – postgraduate student of the Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8266-4092>, e-mail: [r0009-0008-8266-4092](mailto:r0009-0008-8266-4092)

*Alexander N. Baranov* - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Forest Engineering, Institute of Forest Technologies, Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>, e-mail: [aleksandr-baranov-55@mail.ru](mailto:aleksandr-baranov-55@mail.ru)

*Vladimir A. Morkovin* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru)

*Olga A. Kunitskaya* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex of the Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8542-9380>, e-mail: [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru)

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/11>

УДК 630.181



## Влияние хронического радиоактивного загрязнения в условиях Южного Нечерноземья на семенную продуктивность *Pinus sylvestris* L.

Анна В. Скок<sup>1</sup> ✉, [s.anna.v@mail.ru](mailto:s.anna.v@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-1128-8102>

Андрей А. Скок<sup>1</sup>, [andreyskok5@mail.ru](mailto:andreyskok5@mail.ru),  <https://orcid.org/0009-0008-9035-107X>

Владимир Н. Сорокопудов<sup>2</sup>, [sorokopud2301@mail.ru](mailto:sorokopud2301@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-0133-6919>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», проспект Станке Димитрова, 3, г. Брянск, 241037, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений», ул. Грина, 7, г. Москва, 117216, Российская Федерация

В условиях ионизирующего облучения растений воздействие на лесовосстановление проявляется по семенной продуктивности. Важна масса и всхожесть семян. Пробные площади располагаются на территории Южного Нечерноземья России в массивах Красногорского участкового лесничества Брянской области и Учебно-опытного лесхоза ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет». Исследования проводили на 6 пробных площадях, одна из которых являлась контролем. На каждой пробной площади произрастают по 20 модельных деревьев. В период 2021 и 2022 года проведено исследование. Измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД) проводили дозиметром ДРГ - 01Т на высоте 1 м от поверхности земли и на почве. Проращивание семян проводили на растительном аппарате. Вычислялись основные статистические показатели: средняя арифметическая величина с ошибкой, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации, точность опыта. Хроническое радиационное излучение вызывает увеличение длины, ширины, массы шишек сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). С увеличением уровня ионизирующего облучения снижается масса семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.). Среди непроросших семян преобладают нежизнеспособные, имеющие эндосперм и зародыш. Закономерно возрастает общее количество пустых и беззародышевых семян с увеличением уровня ионизирующего излучения. Прямая зависимость количества проростков с аномалиями развития от уровня ионизирующего излучения не зафиксирована. Мутационные процессы связаны с изменением генетического материала. Семена сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) из насаждений с хроническим ионизирующим излучением имеют высокую всхожесть (более 65%), семена кондиционные.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., ионизирующее излучение, семена, шишки.

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Скок А.В. Влияние хронического радиоактивного загрязнения в условиях Южного Нечерноземья на семенную продуктивность *Pinus sylvestris* L. / А.В. Скок, А.А. Скок, В.Н. Сорокопудов // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 167-187. – Библиогр.: с. 183-186 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/11>.

Поступила 08.12.2024. Пересмотрена 11.02.2025. Принята 05.03.2025. Опубликована онлайн 24.03.2025.

Article

## Influence of chronic radioactive pollution in the conditions of the Southern Non-black earth region on the *Pinus sylvestris* L. seed productivity

Anna V. Skok<sup>1</sup> ✉, [s.anna.v@mail.ru](mailto:s.anna.v@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-1128-8102>

Andrey A. Skok<sup>1</sup>, [andreyskok5@mail.ru](mailto:andreyskok5@mail.ru),  <https://orcid.org/0009-0008-9035-107X>

Vladimir N. Sorokopudov<sup>2</sup>, [sorokopud2301@mail.ru](mailto:sorokopud2301@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-0133-6919>

<sup>1</sup>FGBOU VO "Bryansk State University of Engineering and Technology", 3 Stanke Dimitrov Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation

<sup>2</sup>FGBNU "All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants", 7 Grina str., Moscow, 117216, Russian Federation

### Abstract

In conditions of radioactive contamination, one of the criteria for the state of the female reproductive sphere of woody plants is their ability to form seeds, the biological qualities of which are assessed by germination and weight. The research was carried out on the territory of the Southern Non-Black Earth Region of Russia in the plantings of the Krasnogorsk district forestry of the Bryansk region and the Educational and Experimental Forestry Enterprise of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "BGITU". The exposure dose rate was measured at a height of 1 m from the ground surface and on the soil with a DRG - 01T dose meter with an accuracy of 1.0  $\mu\text{R/h}$ , annually at constant reference points (at least 5 on each sample area) in a five-fold repetition. Seed germination was carried out on a growing apparatus. When processing experimental data, the main statistical indicators for each variation series were calculated: the arithmetic mean with error, the mean square deviation, the coefficient of variation, and the accuracy of the experiment. Chronic ionizing radiation causes an increase in the length, width, and weight of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) cones. As the level of ionizing radiation increases, the seed weight of Scots pine (*P. sylvestris* L.) decreases. The germination rate of Scots pine (*P. sylvestris* L.) seeds from plantations with chronic ionizing radiation is quite high (more than 65%). Among ungerminated seeds, nonviable seeds with endosperm and embryo predominate. With an increase in the level of ionizing radiation, the total number of empty and embryoless seeds naturally increases.

**Keywords:** *Pinus sylvestris* L., ionizing radiation, seeds, cones.

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declares no conflict of interest.

**For citation:** Skok A.V., Skok A.A., Sorokopudov V.N. (2025). Influence of chronic radioactive pollution in the conditions of the Southern Non-black earth region on the *Pinus sylvestris* L. seed productivity. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 167-187 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/11>.

**Received** 08.12.2024. **Revised** 11.02.2025. **Accepted** 05.03.2025. **Published online** 24.03.2025.

## Введение

С увеличением мощности экспозиционной дозы (МЭД) наблюдается накопительный эффект хронического облучения и эффект снижения всхожести семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.). Сосна обыкновенная (*P. sylvestris* L.) – основной лесобразующий вид растений. Семеношение сосны имеет существенное значение для лесовозобновления. Семена облученных растений требуют исследования на предмет отсутствия мутационных процессов.

А.П. Дегтярова (2022) [3], С.Н. Тарханов и др. (2021) [16] отмечают, что условия региона исследования влияют на генеративную сферу сосны обыкновенной, что проявляется в показателях семенной продуктивности.

С.В. Битаршвили и др. (2022) [1] считает, что реакция на хроническое облучение сосны обыкновенной могут быть связаны как с присутствующими им видовыми различиями, так и с тем, что у молодых деревьев гормональные процессы протекают гораздо более активно, чем у более старших деревьев.

В.Т. Ярмишко и О. В. Игнатъева (2021) [19], Т.П. Новикова и др. (2022) [12] отмечают, что аэротехногенное загрязнение с примесью тяжелых металлов является основной причиной повреждения, ослабления и разрушения сосновых лесов. Под воздействием поллютантов заметно ухудшается виталитетная структура средневозрастных сосняков.

А.И. Смирнов и др. (2020) [15] утверждает о том, что при обработке семян низкочастотным электромагнитным полем, всхожесть возрастает. Электромагнитное поле стимулирует прорастание семян.

В.Н. Дрожжина (2023) [5], Besschetnova N.N. и др. (2023) [22] утверждает, что в условиях

загрязнения окружающей среды выбросами техногенного происхождения различного генеза наблюдается изменение параметров генеративных органов у *Pinus sylvestris* L. Эти изменения зависят от уровня загрязнения и могут быть использованы в качестве диагностических признаков для мониторинга состояния территорий, подверженных воздействию поллютантов.

А.П. Сердюкова (2020) [14] отмечает, что антропогенный фактор влияет на степень деградации участка, что приводит к увеличению количества пустых семян в шишках сосны обыкновенной.

Е.Н. Наквасина и др. (2023) [11], Yelkenova B.Z. и др. (2020) [21] считают, что сосна обыкновенная является биоиндикатором экологической обстановки и реагирует на изменение климатических показателей. Факторы абиотические вызывают изменения размеров шишек сосны обыкновенной и количества семян. У растений изменяются морфологические параметры и репродуктивные показатели в ответ на факторы климата.

Н. Ф. Кузнецова (2023) [9] отмечает, что при неустойчивом воздействии абиотических факторов уровень полнозернистости популяций и число семян сосны обыкновенной снижается соответственно, уровень смертности семян повышается.

Г.А. Кистерный (2022) [6] считает, что морфологические признаки шишек сосны обыкновенной в меньшей степени реагируют на изменения внешних факторов воздействия. Количество полнозернистых семян в большей степени зависит от воздействия абиотических факторов. У сосны обыкновенной генеративные органы более чувствительны к изменяющимся условиям произрастания. При заражении сосны обыкновенной грибными заболеваниями уменьшаются размеры шишек.

Н.Ф.Кузнецова и Е.С.Клушевская (2020) [7], А.В. Чупров и др. (2021) [18], А.П. Сердюкова (2019) [13] утверждают, что растения могут адаптироваться к техногенному воздействию. В процессе адаптации к стрессу растения снижают объем семеношения и качества семян.

А.П. Дегтярова (2021) [2], (2023) [4] установила, что здоровые растения, имеющие высокий балл общего жизненного состояния, имеют большее число семян в шишках и высокий процент полнозерности.

Н. Ф. Кузнецова (2022) [8], М.И. Михайлова и др. (2023) [10] отмечают, что зависимость генеративной сферы сосны обыкновенной от абиотических факторов приводит к формированию разных генотипов. Для растений характерна высокая внутривидовая изменчивость деревьев по числу семян в шишках.

### Объект и предмет исследований

Объекты постоянной лесосеменной базы сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), как главной лесообразующей породы региона, до настоящего времени подвергаются хроническому воздействию ионизирующих излучений. Женская репродуктивная сфера хвойных видов растений испытывает влияние радиационного фона и это влияет на урожайность шишек и семян.

На территории Южного Нечерноземья России располагаются пробные площади (ПП).

В регионе умеренно-континентальный климат.

Каждая пробная площадь отличается степенью ионизирующего облучения.

В зоне отчуждения (плотность загрязнения почвы свыше 80 Ки/км<sup>2</sup>) Красногорского участкового лесничества Брянской области, кв.4, МЭД=629,1 мкР/ч) находится ПП№1. Состав насаждения - 10С+Е,Б, тип леса сосняк – бруснично-черничный, тип условий произрастания - А<sub>2</sub> - В<sub>2</sub>, возраст - 64 года. ПП№ 2 располагается в зоне отчуждения (плотность загрязнения почвы – 40 - 80 Ки/км<sup>2</sup>) Красногорского участкового лесничества Брянской области, кв.21, МЭД=224,4 мкР/ч. Состав насаждения - 10С, тип леса сосняк – бруснично-черничный, тип условий произрастания - А<sub>2</sub> - В<sub>2</sub>, возраст – 68 лет. ПП №3 располагается в зоне

проживания с правом на отселение (плотность загрязнения почвы - 5,1 - 15 Ки/км<sup>2</sup>) Красногорского участкового лесничества Брянской области, кв.16, МЭД=195,5 мкР/ч. Состав насаждения - 10С+Б, тип леса - сосняк - бруснично-черничный, тип условий произрастания - А<sub>2</sub> - В<sub>2</sub>, возраст - 68 лет. ПП №4 располагается в зоне проживания с правом на отселение (плотность загрязнения почвы - 5,1 - 15 Ки/км<sup>2</sup>) Красногорского участкового лесничества Брянской области, кв.16, МЭД=151,3 мкР/ч. Состав насаждения - 10С+Б, тип леса - сосняк - бруснично-черничный, тип условий произрастания - А<sub>2</sub> - В<sub>2</sub>, возраст - 68 лет. ПП №5 располагается в Красногорском участковом лесничестве Брянской области, кв.14, МЭД=35,3 мкР/ч. Состав насаждения - 10С+Б, тип леса - сосняк - бруснично-черничный, тип условий произрастания - А<sub>2</sub> - В<sub>2</sub>, возраст - 61 год. ПП№ 6 находится в относительно чистой зоне (плотность загрязнения менее 1 Ки/км<sup>2</sup>) в Учебно-опытном лесхозе ФГБОУ ВО «БГИТУ», Опытное лесничество, кв.75, МЭД=10,0 мкР/ч (контроль). Состав насаждения - 10С+Б, тип леса - сосняк – бруснично-черничный, 66 лет, условия произрастания А<sub>2</sub> - В<sub>2</sub>.

### Сбор данных

Измерения МЭД проводили на высоте 1 м от поверхности земли и на почве дозиметром ДРГ - 01Т с точностью до 1,0 мкР/ч, ежегодно на постоянных реперных точках (не менее 5 на каждой пробной площади (ПП)) в пятикратной повторности.

С модельных деревьев в течении 2 лет (2021, 2022 гг.) собирали по 30 - 50 шишек в средней части кроны с южной стороны. Длину и ширину шишек измеряли при помощи штангенциркуля с точностью до 0,1 мм. Определяли массу одной шишки и массу 1000 семян с точностью до 0,01 г. Для анализа семенной продуктивности с каждого модельного дерева получали семена, которые сортировались на полнозерные и пустые.

Вычислялись средние биометрические показатели шишек и семян для каждого модельного дерева. Определялась средняя масса полнозерных семян в шишке. Выход полнозерных семян также вычислялся для каждого модельного дерева (отношение массы полнозерных семян в

шишке к массе шишки, %). Затем вычисляли средние показатели для ПП.

Семена с модельных деревьев хранили в сухом неотопляемом помещении, в стеклянных пузырьках с притертой пробкой при  $t=0...+5^{\circ}\text{C}$ .

Проращивание семян проводили по ГОСТ 13056.6-75 на растильном аппарате при  $t$  около  $+26^{\circ}\text{C}$ . От каждого модельного дерева бралось по 200 семян (в 2 повторностях по 100 семян). Учет всхожести велся ежедневно в течение 15 дней. Определяли энергию прорастания за 7 дней, техническую и абсолютную всхожесть за 15 дней проращивания. Непроросшие семена после взрезывания разделены на пустые, нежизнеспособные, беззародышевые, ненормально проросшие, загнившие и поврежденные. Абсолютная всхожесть (%) определялась как отношение количества проросших семян к количеству семян, имеющих зародыш. Класс качества семян устанавливали по ГОСТ 14161-86.

### Анализ данных

При обработке экспериментальных данных по каждому признаку определяли среднеарифметическую величину ( $M$ ), среднее квадратическое отклонение ( $\sigma$ ), коэффициент изменчивости ( $C$ , %), основную ошибку средней величины ( $m$ ) и точность опыта ( $P$ , %) [17]:

Средняя арифметическая величина ( $M$ ):

$$M = \sum p * \frac{K}{N}, \text{ где}$$

$p$  - варианта (ступень), входящая в состав данной совокупности;

$N$  - общее число наблюдений или объемы выборочной совокупности;

$K$  - численность, вариант или частота повторяемости признака.

Среднее квадратическое отклонение ( $\sigma$ ):

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum * K * \alpha^2}{N}}, \text{ где}$$

$K$  - частота повторяемости признаков;

$\alpha$  - отклонение средней величины;

$N$  - количество наблюдений.

Коэффициент изменчивости ( $C$ ):

$$C = 100 * \frac{\sigma}{M}, \text{ где}$$

$\sigma$  - среднее квадратическое отклонение;

$M$  - средняя величина признака.

Ошибка средней величины ( $m$ ):

$$m = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \text{ где}$$

$\sigma$  - среднее квадратическое отклонение;

$N$  - количество наблюдений.

Показатель точности опыта ( $P$ ):

$$P = \pm \frac{m * 100}{M};$$

Определение степени изменчивости признаков проводили по шкале С.А. Мамаева.

### Результаты

При анализе размеров шишек сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в 2021 году (табл. 1) длина растет при увеличении радиационного загрязнения. В относительно чистом районе прорастания растений (контроль) длина и ширина шишек меньше, чем в районах с хроническим ионизирующим облучением.

Достоверно уменьшена длина шишек с ПП № 1 ( $39,93 \pm 1,892$ ) (при МЭД =  $629,1 \pm 3,7$  мкР/ч в сравнении с ПП № 4 ( $45,67 \pm 1,376$ ) (МЭД =  $151,3 \pm 2,3$  мкР/ч,  $P = 95\%$ ) и ПП № 5 ( $44,70 \pm 1,789$ ) (при МЭД =  $35,3 \pm 1,1$  мкР/ч,  $P = 99,9\%$ ).

Таблица 1

Вариабельность шишек и семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в 2021г.

Table 1

Variability of cones and seeds *Pinus sylvestris* L. in 2021 year

№ ПП   № ТА	МЭД мкР/ч   MD md/hr	Размеры шишек, мм   The size of the cones, mm		Масса одной шишки, г   The weight of one lump, g	Масса 1000 семян, г   Weight of 1000 seeds, g
		длина   length	ширина   width		
1	$629,1 \pm 3,7$	$39,93 \pm 1,892$	$20,73 \pm 0,883$	$6,74 \pm 0,615$	$6,03 \pm 0,323$
2	$224,4 \pm 2,8$	$41,02 \pm 0,902$	$22,13 \pm 0,323$	$7,13 \pm 0,421$	$6,13 \pm 0,226$
3	$195,5 \pm 1,2$	$43,11 \pm 1,434$	$21,67 \pm 0,751$	$8,36 \pm 0,481$	$6,98 \pm 0,211$

## Природопользование

4	151,3±2,3	45,67± 1,376	20,65± 0,376	7,36± 0,623	7,16± 0,200
5	35,3±1,1	44,70± 1,789	23,80± 0,740	9,78± 0,705	7,29± 0,293
6	10,0±0,9	36,99± 1,041	19,07± 0,449	5,15± 0,482	7,36± 0,278

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

На ПП №5 (МЭД = 35,3±1,1) ширина шишек 23,80± 0,740 (наибольшая), в контроле 19,07± 0,449 - наименьшая ( $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$  при  $P=99,9\%$ ).

Масса шишек увеличивается с ростом уровня ионизирующего излучения.

На ПП №5 (9,78± 0,705) (при МЭД = 35,3±1,1) и ПП №3 (8,36±0,481) (при МЭД=195,5±1,2 мкР/ч) установлено увеличение массы по сравнению с контролем:  $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$  при  $P=99,0\%$ .

Вес семян под влиянием ионизирующего облучения понижается.

Вес семян снижен значимо на ПП № 2 (6,13±0,226) (при МЭД=224,4±2,8 мкР/ч) и ПП № 1 (6,03± 0,323) (МЭД=629,1±3,7 мкР/ч) по сравнению с контролем:  $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$  при  $P=95,0\%$ .

При изучении размеров шишек сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в 2022 году подтверждена тенденция увеличения их размеров с ростом ионизирующего излучения (таблица 2).

Достоверно увеличена (при сравнении с контролем) длина шишек с ПП № 1 (43,02±0,91) (при МЭД = 211,5±3,2 мкР/ч,  $P = 95\%$ ), с ПП № 4

(44,62±1,21) (МЭД=149,4±1,3 мкР/ч,  $P = 95\%$ ) и ПП № 5 (43,32±1,78) (при МЭД=38,1±1,5 мкР/ч,  $P=99,0\%$ ).

На ПП № 4 (23,66±0,37) (при МЭД=149,4±1,3 мкР/ч) установлена наибольшая ширина шишек, а наименьшая ширина шишек в контроле (19,05±0,44) ( $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$  при  $P=99,9\%$ ).

Вес шишек увеличивается при увеличении хронического ионизирующего облучения. Установлен достоверный рост массы шишек по сравнению с контрольными образцами (5,21±0,98) на ПП № 5 (9,23± 0,68) (МЭД=38,1±1,5 мкР/ч,  $P=99,0\%$ ).

У сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) вес семян в радиоактивно загрязненных районах снижается. Вес семян значимо снижен по сравнению с контролем (7,36± 0,20) на ПП №1 (6,05±0,14) (МЭД=625,2±2,6 мкР/ч),  $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$  при  $P=95,0\%$ ).

Таким образом, у сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) под влиянием хронического радиационного облучения размеры шишек увеличиваются (масса, длина, ширина), а масса семян снижается.

Таблица 2

Вариабельность шишек и семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в 2022 г.

Table 2

Variability of cones and seeds *Pinus sylvestris* L. in 2022 year

№ ПП   № ТА	МЭД мкР/ч   MD md/hr	Размеры шишек, мм   The size of the cones, mm		Масса одной шишки, г   The weight of one lump, g	Масса 1000 семян, г   Weight of 1000 seeds, g
		длина   length	ширина   width		
1	625,2±2,6	43,02 ±0,91	20,13± 0,32	6,98± 0,32	6,05±0,14
2	211,5±3,2	38,73± 1,86	21,73± 0,88	6,54±0,51	7,64± 0,13
3	197,7±2,4	42,32± 1,34	21,62± 0,75	8,36±0,48	6,60± 0,16
4	149,4±1,3	44,62± 1,21	23,66± 0,37	7,75± 0,60	6,87± 0,10
5	38,1±1,5	43,32± 1,78	22,88± 0,74	9,23± 0,68	7,06± 0,28
6	11,3±0,28	35,85± 1,02	19,05± 0,44	5,21± 0,98	7,36± 0,20

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

При проращивании семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в 2021 году установлена высокая всхожесть и энергия прорастания семян на всех ПП (таблица 3).

Семена соответствуют I, II и III классу качества и кондиционные.

Семена сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) контрольного района произрастания наиболее энергично проросли - 84,55 %. На ПП №5 (МЭД=35,3±1,1 мкР/ч) за 7 суток проросло 83,18%. На ПП №2 (МЭД=224,4±2,8 мкР/ч) - за 7 суток проросло 64,12 % (наименее энергичное прорастание семян).

У сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) всхожесть семян насаждений с хроническим ионизирующим излучением высокая, но снижена по сравнению с контролем.

Изменчивость внутривидовая всхожести семян имеет низкий уровень и в насаждениях, находящихся под воздействием радиационного фона на территории Брянска – в контроле.

Лабораторная всхожесть семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) и абсолютная самая высокая на ПП №5 – 94,6% (МЭД=35,3±1,1 мкР/ч), наименьшая на ПП №4 – 80,3% (МЭД=151,3±2,3 мкР/ч), в контроле она составила 92,1 %.

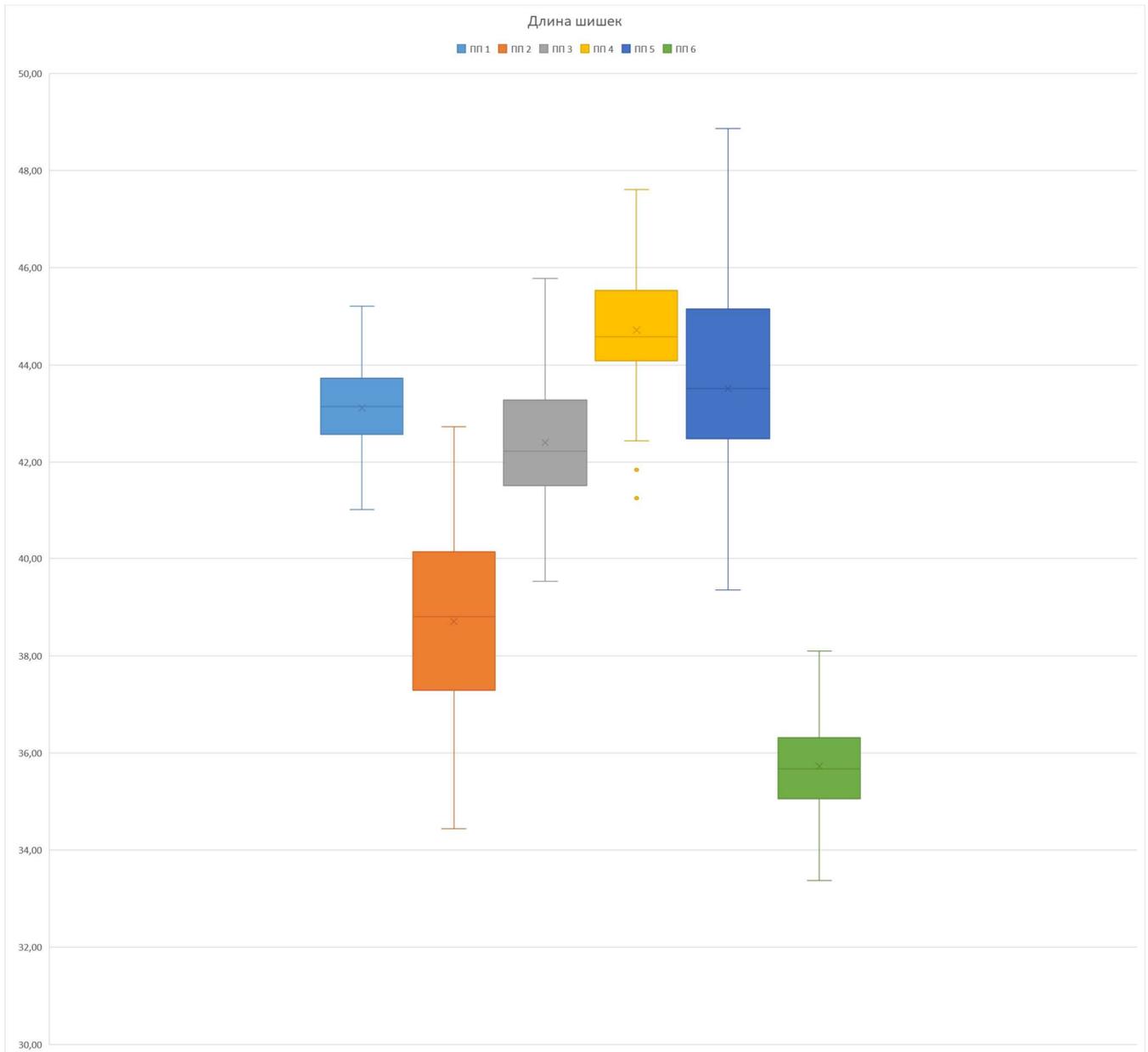
Наибольшее количество пустых семян выявлено на ПП №5 (МЭД=35,3±1,1 мкР/ч) и составило 2,89%. Наименьшее количество пустых семян на ПП №2 (МЭД=224,4±2,8 мкР/ч) - 0,82%. Это говорит о более жестком естественном отборе в загрязненных насаждениях.

Мутационная изменчивость определяется наличием неправильно проросших семян. В исследованиях не установлена достоверная зависимость уровня радиационного облучения и количества аномальных проросших семян. Явление развития только стебелька при нарушенной деятельности апикальной меристемы корешков характеризует мутационные изменения.

Изменчивость длины шишек сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Chart 1

Variability of length cones *Pinus sylvestris* L.

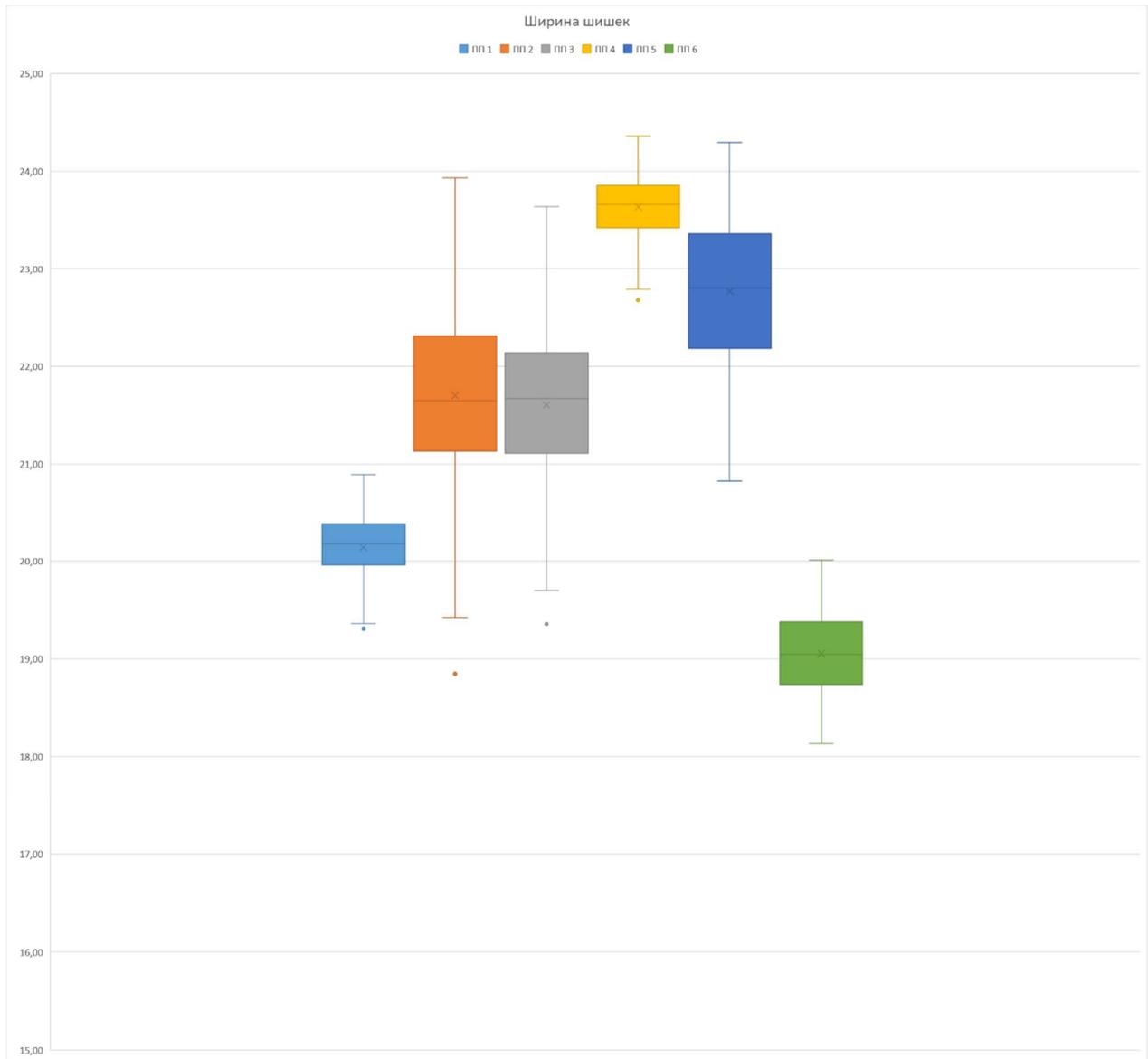


Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Изменчивость ширины шишек сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Chart 2

Variability of width cones *Pinus sylvestris* L.

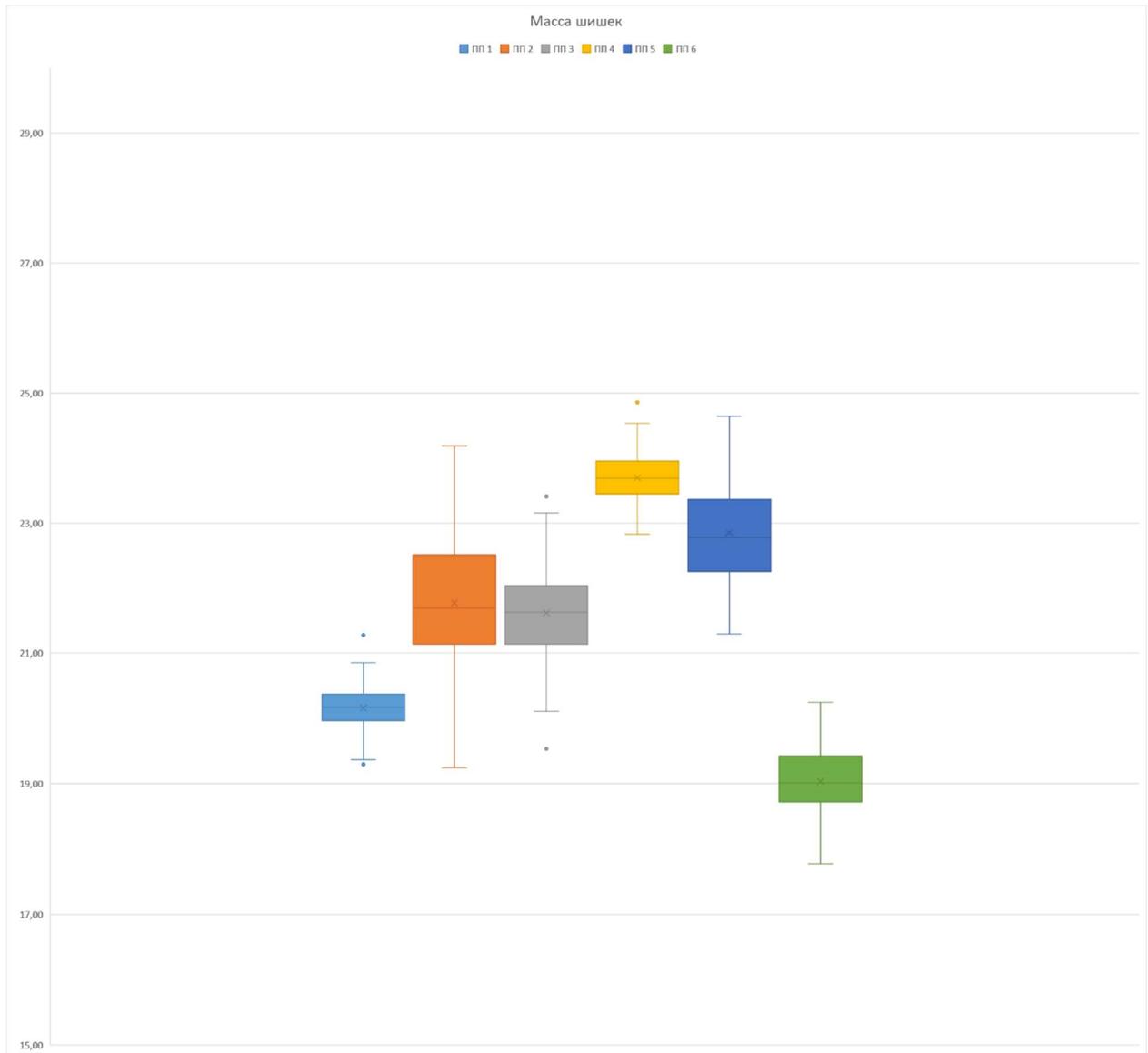


Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Изменчивость массы шишек сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Chart 3

Variability of weight cones *Pinus sylvestris* L.

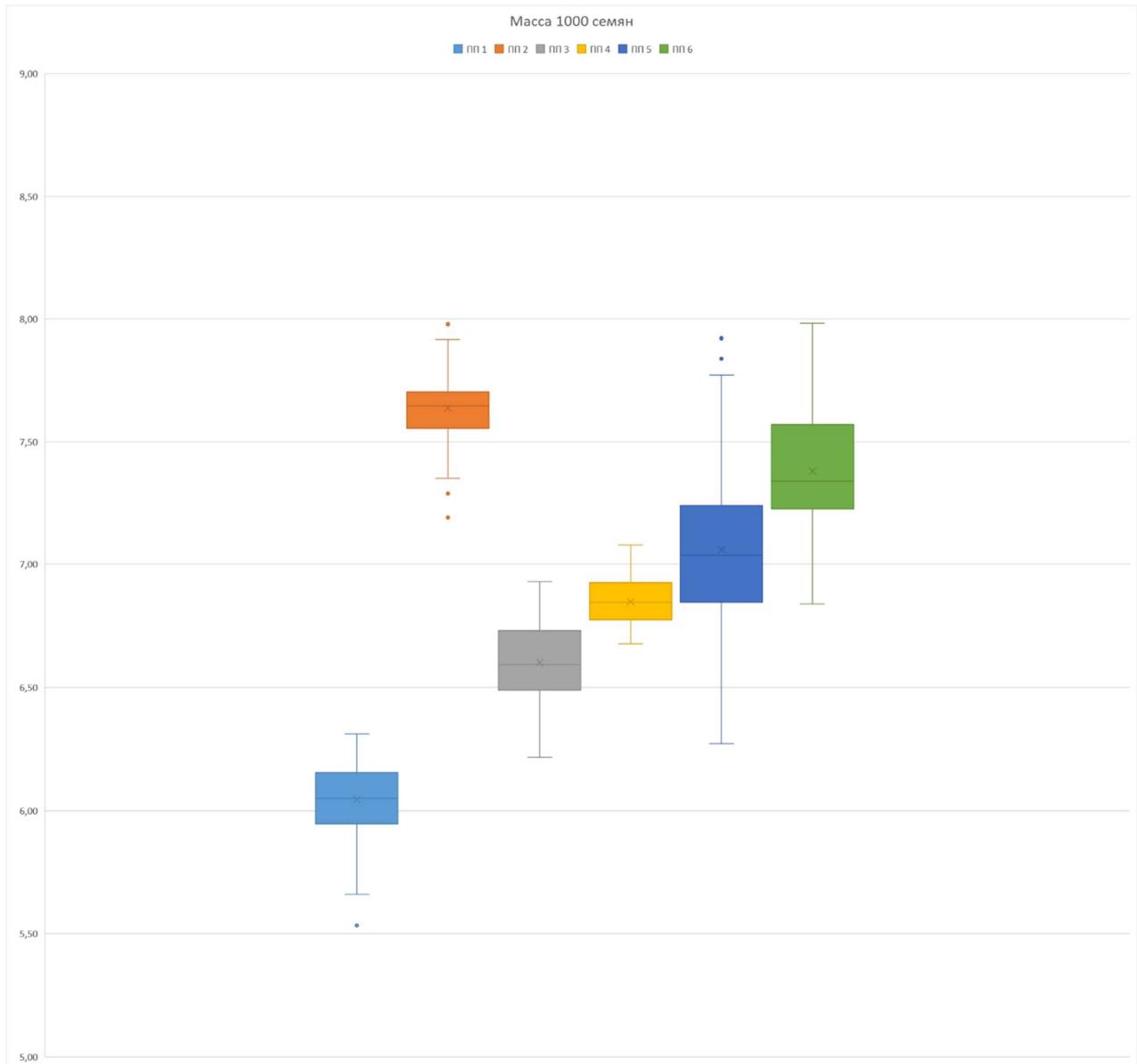


Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Изменчивость массы семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Chart 4

Variability of weight seeds *Pinus sylvestris* L.



Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Таблица 3

Изменчивость прорастания семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) 2021 г.

Table 3

Variability of seed germination *Pinus sylvestris* L. 2021 y.

№. ПП. №. ТАС	МЭД, мкР/ч MD-mg/hч	Среднее количество (%) проросших семян: Average number (%) of germinated seeds							Отношение энергии прорастания в % The ratio of the energy of growth to germination in %	Класс качества Quality class
		3 сут. 3-day	4 сут. 4-day	5 сут. 5-day	7 сут. 7-day	10 сут. 10-days	15 сут. (всхожесть семян) M±mр	δс v, %		
1а	629,1±3,7а	1,82а	30,77а	59,89а	80,24а	85,81а	86,72±2,01а	7,83а	9,0а	IIа
2а	224,4±2,8а	2,11а	36,57а	62,67а	64,12а	84,32а	85,36±2,34а	7,07а	8,4а	IIа
3а	195,5±1,2а	1,81а	25,32а	42,23а	78,80а	75,53а	80,42±3,67а	10,44а	13,4а	IIа
4а	151,3±2,3а	1,46а	17,39а	39,98а	75,88а	75,41а	78,89±6,86а	20,12а	25,0а	IIIа
5а	35,3±1,1а	1,91а	26,57а	52,67а	83,18а	80,42а	81,36±2,82а	7,27а	8,5а	IIа
6а	10,0±0,9а	-а	19,74а	59,12а	84,55а	89,83а	91,81±2,70а	8,56а	9,3а	Iа

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Зависимость уровня ионизирующего излучения и количества непроросших и абсолютной всхожести семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Table 4

The effect of the pollution level of the air basin on the number of ungerminated and absolute germination of seeds *Pinus sylvestris* L.

№ ПП   № ТА	МЭД мкР/ч   MD md/hr	Среднее количество непроросших семян, % / Average number of ungerminated seeds, %					Абсолютная всхожесть семян, % / Absolute seed germination, %
		Всего / in total	в том числе / including				
			пустые / empty	ненормально проросшие / abnormal y sprouted	нежизнеспособные / the unfit	Без зародышевые / without childbirth	
1	629,1±3,7	11,21	2,49	0,50	7,62	2,25	91,54
2	224,4±2,8	13,65	0,82	1,95	4,78	1,09	87,81
3	195,5±1,2	17,36	1,27	2,67	16,43	0,71	81,72
4	151,3±2,3	20,12	1,53	0,56	19,68	-	78,94
5	35,3±1,1	19,38	2,89	2,21	9,73	0,81	80,32
6	10,0±0,9	8,19	2,14	0,73	4,89	0,43	94,23

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Наибольшее количество ненормально проросших семян выявлено на ПП № 3 (МЭД=195,5±1,2 мкР/ч) - 2,67%. Наименьшее количество ненормально проросших семян на ПП №1 (МЭД=629,1±3,7 мкР/ч) - 0,50%, что на 0,23 % меньше, чем в контроле. Количество нежизнеспособных семян превышает на ПП № 4 (МЭД=151,3±2,3 мкР/ч) - 19,68%, что почти в 4 раза больше, чем в контроле. Наименьшее количество нежизнеспособных семян на ПП № 2 (МЭД=224,4±2,8 мкР/ч) - 4,78%. Следует отметить, что на ПП №4 (МЭД=151,3±2,3 мкР/ч) отсутствуют беззародышевые семена.

Непроросшие семена сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) имеют эндосперм и зародыш и являются нежизнеспособными.

Проведен корреляционный анализ связи уровня радиационного загрязнения и посевных качеств семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.).

Тесная положительная связь с уровнем ионизирующего излучения зафиксирована у проросших семян за 7 суток ( $r = + 0,885$ ), за 10 суток ( $r = + 0,812$ ), 15 суток ( $r = + 0,798$ ),  $t_{факт} > t_{табл}$  при  $P = 95\%$ .

Установлена тесная положительная связь энергии прорастания к всхожести  $t_{факт} > t_{табл}$  при  $P = 95,0\%$  ( $r = + 0,792$ ), и абсолютной всхожести,  $t_{факт} > t_{табл}$  при  $P = 99,0\%$  ( $r = + 0,879$ ).

Отсутствует достоверная зависимость количества проросших семян в первые дни прорастания от уровня ионизирующего излучения. Установлена только положительная тенденция связи.

Всхожесть семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) увеличивается с ростом уровня ионизирующего излучения.

Установлена отрицательная связь массы семян и МЭД,  $t_{факт} > t_{табл}$  при  $P = 95,0\%$ .

Масса семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) снижается с увеличением уровня ионизирующего излучения.

Семена сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) урожая 2022 года имеют высокую всхожесть и энергию прорастания (таблица 5).

Семена сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) соответствуют II и III классу качества, кондиционные.

Таблица 5

Изменчивость прорастания семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) 2022 г.

Table 5

Variability of seed germination *Pinus sylvestris* L. 2022 y

№ ПП № ТА	МЭД мР/ч   MD md/hr	Среднее количество (%) проросших семян   Average number (%) of germinated seeds						15 сут. (всхожесть семян)   15 day (seed germination)		Отношение энергии прорастания к всхожести в %   The ratio of the energy of growth to germination in %	Класс качества   Quality class
		3 сут.   3 day	4 сут.   4 day	5 сут.   5 day	7 сут.   7 day	10 сут.   10 day	M±m <sub>x</sub>	δ	v, %		
1	625,2±2,6	-	5,45	19,73	51,29	72,72	70,78±5,12	7,14	15,10	71,8	III
2	211,5±3,2	-	6,32	21,51	57,76	70,83	82,23±6,20	12,41	22,67	69,4	II
3	197,7±2,4	-	9,24	19,65	46,72	58,87	69,05±9,91	26,98	25,90	67,3	III
4	149,4±1,3	-	18,58	36,87	61,21	69,51	78,06±7,70	16,91	19,60	81,3	III
5	38,1±1,5	-	8,11	17,98	51,88	58,77	69,05±9,96	26,93	10,89	65,6	III
6	11,3±0,28	-	3,08	12,54	46,51	67,27	72,07±9,54	16,60	23,00	64,5	III

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

## Природопользование

Не установлена достоверная зависимость всхожести от уровня ионизирующего облучения у семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) урожая 2022 г. На 4 и 5 сутки количество проросших семян на учетных площадках значительно выше, чем в контроле. Наибольшая энергия прорастания была зафиксирована на ПП №4 (МЭД=149,4±1,3 мкР/ч) - 61,21 %, наименьшая энергия прорастания зафиксирована в контроле – 46,51 %.

В наименее загрязненном насаждении ПП №5 (МЭД=38,1±1,5 мкР/ч) отмечен низкий уро-

вень внутрипопуляционной изменчивости всхожести семян ( $v = 10,89$  %).

Количество беззародышевых семян в основном повышается с увеличением уровня ионизирующего излучения (есть эндосперм, нет зародыша): больше всего при наименьшем уровне радиоактивного загрязнения ПП №5 (МЭД=38,1±1,5 мкР/ч) - 1,96%, меньше всего - в контроле - 0,69 %. Интересно отметить, что в загрязненных насаждениях закономерно возрастает с увеличением уровня ионизирующего излучения общее количество пустых и беззародышевых семян (табл. 6).

Таблица 6

Зависимость уровня ионизирующего излучения и количества непроросших и абсолютной всхожести семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Table 6

The effect of the pollution level of the air basin on the number of ungerminated and absolute germination of seeds

*Pinus sylvestris* L.

№ ПП   № ТА	МЭД мкР/ч   MD md/hr	Среднее количество непроросших семян, % / Average number of ungerminated seeds, %					Абсолютная всхожесть семян, % / Absolute seed germination, %
		всего / in total	в том числе / including				
			пустые / empty	ненормально проросшие / abnormally sprouted	нежизнеспособные / the unfit	без зародышевых / without childbirth	
1	625,2±2,6	25,21	13,23	-	13,0	1,61	84,63
2	211,5±3,2	12,34	7,87	0,73	25,58	1,53	90,06
3	197,7±2,4	34,87	5,15	1,26	15,73	1,57	73,98
4	149,4±1,3	23,85	7,84	1,41	18,87	1,47	81,11
5	38,1±1,5	29,43	10,52	1,77	17,67	1,96	86,13
6	11,3±0,28	27,93	5,92	1,02	20,30	0,69	77,17

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Отсутствует корреляционная зависимость ненормально проросших семян и степени ионизирующего облучения. Наличие аномальных проростков свидетельствует о происходящих мутационных процессах.

На ПП №5 при МЭД=38,1±1,5 мкР/ч установлено наибольшее количество неправильно проросших семян - 1,77%. На ПП № 2 (МЭД=211,5±3,2 мкР/ч) – наименьшее (0,73%).

При корреляционном анализе связи количества непроросших семян с уровнем радиоактивного загрязнения тесная положительная связь по всем ПП достоверная при  $P=95\%$ , зафиксирована у количества пустых семян ( $r = + 0,916$  для всех ПП) и достоверная в высокой степени ( $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$  при  $P = 99,0\%$ ) у общего количества простых и беззародышевых семян ( $r = + 0,942$  - для всех ПП). Положительная тенденция у связи количества беззародышевых семян с уровнем загрязнения воздушного бассейна ( $r = + 0,552$  - для всех ПП), показатели  $r$  довольно высоки, но недостоверны ( $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$ ).

У сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) с возрастом уровня ионизирующего излучения

увеличивается количества семян пустых и без зародыша.

Тесная достоверная отрицательная связь ( $r = - 0,71$ ) установлена между аномально проросшими семенами и уровнем ионизирующего излучения ( $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$  при  $P = 95,0\%$ ).

Сосна обыкновенная (*P. sylvestris* L.), произрастающая в насаждениях с хроническим ионизирующим излучением, имеет кондиционные семена с высокой всхожестью.

Корреляционная связь зависимости веса семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) от всхожести не подтвердилась. Отсутствует прямолинейная зависимость изменчивости всхожести семян (табл. 7).

Таблица 7

Корреляционный анализ зависимости массы семян и всхожести у сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) по годам

Table 7

Correlation analysis of the relationship of germination with the mass of 1000 seeds in *Pinus sylvestris* L. by year

Показатели корреляции / Correlation indicators	Коэффициенты корреляции (r) всхожести с массой 1000 семян по годам / Correlation coefficients (r) of germination with the mass of 1000 seeds by year			
	2020	2021	2022	Среднегодовалые / Average young people
По всем пробным площадям (с контролем) / For all test areas (with control)				
$r \pm m_r$	-0,765±0,3868	+0,530±0,2400	+0,041±0,4762	+0,215±0,4770
$t_{\text{факт}}$	1,901	1,766	0,081	0,450
ПП №1,2,3,4,5				
$r \pm m_r$	-0,920±0,0891	+0,561±0,3955	+0,419±0,4761	+0,288±0,5293
$t_{\text{факт}}$	10,315	1,419	0,880	0,545

Примечание: для N = 3:  $t_{\text{табл}}$  при  $P = 95\%$  - 12,706, при  $P = 99\%$  - 63,657;

для N = 4:  $t_{\text{табл}}$  при  $P = 95\%$  - 4,303, при  $P = 99\%$  - 9,925, при  $P = 99,9\%$  - 31,698.

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

Отсутствует достоверная зависимость всхожести семян с их массой и в 2020 году. Наблюдается отрицательная тенденция связи всхожести семян от их массы ( $r = - 0,920$ , но  $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$ ).

По многолетним данным установлена положительная тенденция связи всхожести семян с их

массой, но достоверная зависимость отсутствует ( $r = + 0,215$  для всех ПП, но  $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$ ).

## Обсуждение

Согласно ранее проведенным исследованиям в 2001 и 2002 годах с увеличением ионизирующего облучения снижались размеры шишек и семян.

Высокие дозы радиоактивного излучения стимулировали прорастание семян в первые сутки, но понижали общую всхожесть. Была установлена положительная корреляционная достоверная связь уровня ионизирующего излучения и количества семян пустых, без зародыша, непроросших, нежизнеспособных.

Рост радиационного излучения увеличивает внутривидовую изменчивость всхожести и массы семян.

## Заключение

Семена сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) 2021-2022 гг., произрастающей в насаждениях с хроническим ионизирующим излучением, кондиционные и имеют высокую всхожесть (уровень значимости  $P=95\%$ ).

Радиоактивное излучение стимулирует рост размеров (длины, ширины, массы) шишек сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) (уровень значимости  $p=99\%$ ). Масса семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) снижается с увеличением уровня ионизирующего излучения (уровень значимости  $P=95\%$ ).

Внутривидовая изменчивость всхожести семян имеет низкий уровень и в насаждениях, находящихся под воздействием радиационного фона, и на территории Брянска – в контроле.

С ростом уровня хронического ионизирующего излучения увеличивается всхожесть семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), а масса семян снижается (уровень значимости  $P=95\%$ ).

Среди семян, которые не проросли, преобладают нежизнеспособные семена, имеющие эндосперм и зародыш. С увеличением уровня ионизирующего излучения закономерно возрастает общее количество пустых и беззародышевых семян.

## Список литературы

1. Битаршвили С.В., Гераськин С.А., Шестерикова Е.М., Празян А.А. Влияние хронического облучения на фитогормональный статус сосен Чернобыльской зоны отчуждения. Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2022; 31; 4: 64-72. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2022-31-4-64-72>
2. Дегтярева А.П. Изменение полнотелости семян сосны обыкновенной в зависимости от общего жизненного состояния дерева. Заметки ученого. 2021; 8: 467-470. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46461906>
3. Дегтярева А.П. Сосна обыкновенная в изменяющихся климатических условиях Центрального Черноземья. Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2022; 144: 14-18. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49750965>
4. Дегтярева А.П. Влияние экологической обстановки на семенную продуктивность *Pinus sylvestris* L. в степной зоне Центрально-Черноземного района России // Научно-агрономический журнал. 2023; 2(121): 46-50. DOI: <https://doi.org/10.34736/FNC.2023.121.2.008.46-50>
5. Дрожжина В.Н. Изменение параметров генеративных органов *Pinus sylvestris* L. в условиях техногенного загрязнения // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2023; 04/2: 13-18. DOI: <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2023.04-2.08>
6. Кистерный Г.А. Состояние женской генеративной сферы сосны обыкновенной в действующем очаге корневой губки (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) / Г.А. Кистерный // Лесотехнический журнал. 2022; 12; 4 (48): 31-46. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/3>
7. Кузнецова Н.Ф., Клушевская Е.С. Смена жизненного состояния как способ выживания *Pinus sylvestris* L. на техногенно загрязненной территории // Принципы экологии. 2020; 2: 40-47. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44527120>

8. Кузнецова Н.Ф. Влияние техногенного загрязнения и засухи на генеративную сферу лесостепных популяций *Pinus sylvestris* L. Хвойные бореальной зоны. 2022; XL; 6: 502-508. DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-6-502-508>
9. Кузнецова Н.Ф. Генеративная сфера сосны обыкновенной как индикатор климатически детерминированной смены жизненных состояний популяций. Лесоведение. 2023; 3: 244-254. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114823030063>
10. Михайлова М.И. О лучших геоэкотипах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) для искусственного лесовосстановления / М.И. Михайлова, М.П. Чернышов, С.В. Ребко // Лесотехнический журнал. 2023; 13; 4(52): 58–71. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/4>
11. Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А., Чупров А.В. Формирование шишек сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях изменения климата. Лесной вестник. 2023; 27; 4: 36-46. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-4-36-46>
12. Новикова Т.П. Влияние климатического индекса градусо-дней на виталитет 3-летних сеянцев сосны обыкновенной из сортированных по спектрометрическим свойствам семян / Т.П. Новикова, В.И. Малышева, Е.П. Петрищев // Лесотехнический журнал. 2022; 12; 1(45): 110–118. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9>
13. Сердюкова А.П. Оценка общего состояния и семенной продуктивности *Pinus sylvestris* L. в разных климатических зонах Воронежской области. Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019; 2: 10-12. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41146360>
14. Сердюкова А.П. Состояние генеративной сферы сосны обыкновенной в условиях засухи и антропогенной нагрузки степной зоны Воронежской области. Global and Regional Research. 2020; 2; 4: 163-168. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44574676>
15. Смирнов А.И., Орлов Ф.С., Васильев С.Б., Аксенов П.А., Никитин В.Ф. Обработка некондиционных семян сосны Банкса (*Pinus banksiana* Lamb.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) низкочастотным электромагнитным полем // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2020; 24; 5: 59–65. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-5-59-65>
16. Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е. Особенности адаптации разных форм сосны обыкновенной в условиях длительного избыточного увлажнения почв // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. 2: 30–44. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-30-44>
17. Теория вероятностей и математическая статистика : учебно-методическое пособие / сост. Н. Л. Марголина, К. Е. Ширяев. – Кострома : Костромской государственной университет. 2022; 124. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50510500>
18. Чупров А.В., Наквасина Е.Н., Прожерина Н.А. Изменчивость шишек сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в географических культурах Архангельской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2021; 25; 3: 24–33. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-24-33>
19. Ярмишко В.Т., Игнатъева О.В. Сообщества *Pinus sylvestris* L. в техногенной среде на Европейском Севере России: структура, особенности роста, состояние. Сибирский лесной журнал. 2021; 3: 44-55. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20210305>
20. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Babich N.A., Bryntsev V.A. Differentiation of plus trees of scots pine by xylem conditions. Russian Forestry Journal. 2023; 4(394): 9-25. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-9-25>
21. Yelkenova B.Z., Beisenova R.R., Karipbayeva N.Sh., Polevik V.V. The influence of atmospheric pollution on the growth and development of pine in the conditions of the Irtysh Semipalatinsk Region. Bulletin of the Karaganda university. Biology. Medicine. Geography Series. 2020; 98; 2: 73-78. DOI: <https://doi.org/10.31489/2020BMG2/73-78>

## References

1. Bitarishvili S.V., Geras'kin S.A., Shesterikova E.M., Prazyan A.A. Vliyanie xronicheskogo oblucheniya na fito-gormonal'ny'j status sosen Chernoby'l'skoj zony' otchuzhdeniya. Radiaciya i risk [Influence of chronic irradiation on phytohormonal status of pines of Chernobyl exclusion zone. Radiation and Risk]. Byulleten' Nacional'nogo radiacionnoe'pidemiologicheskogo registra= Bulletin of the National Radiation and Epidemiologic Register). 2022; 31; 4: 64-72. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2022-31-4-64-72>
2. Degtyareva A.P. Izmenenie polnozernistosti semyan sosny' oby'knovennoj v zavisimosti ot obshhego zhiznennogo sostoyaniya dereva [Variation of full-grainedness of common pine seeds depending on the general life state of the tree]. Zаметki uchenogo= Notes of a scientist. 2021; 8: 467-470. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46461906>
3. Degtyareva A.P. Sosna oby'knoennaya v izmenyayushhixsya klimaticheskix usloviyax Central'nogo Chernozem'ya [Common pine in changing climatic conditions of the Central Black Earth Region]. Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada = Bulletin of the State Nikita Botanical Garden. 2022; 144: 14-18. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49750965>
4. Degtyareva A.P. Vliyanie e'kologicheskoy obstanovki na semennuyu produktivnost' Pinus sylvestris L. v stepnoj zone Central'no-Chernozemnogo rajona Rossii [Influence of environmental conditions on seed productivity of Pinus sylvestris L. in the steppe zone of the Central Chernozem region of Russia]. Nauchno-agronomicheskij zhurnal= Scientific and Agronomic Journal. 2023; 2(121): 46-50. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34736/FNC.2023.121.2.008.46-50>
5. Drozhzhina V.N. Izmenenie parametrov generativny'x organov Pinus sylvestris L. v usloviyax texnogenogo zagryazneniya [Changes in the parameters of generative organs of Pinus sylvestris L. under conditions of technogenic pollution]. Sovremennaya nauka: aktual'ny'e problemy' teorii i praktiki. Seriya: Estestvenny'e i Texnicheskie / Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences. 2023; 04/2: 13-18. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2023.04-2.08>
6. Kisterny'j G.A. Sostoyanie zhenskoy generativnoj sfery' sosny' oby'knovennoj v dejstvuyushhem ochage kornevoj gubki [The state of female generative sphere of the common pine in the active center of the root sponge. Heterobasidion annosum (Fr.) Bref.]. Lesotexnicheskij zhurnal = Forest Engineering Journal. 2022; 12; 4 (48): 31-46. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/3>
7. Kuznecova N.F., Klushevskaya E.S. Smena zhiznennogo sostoyaniya kak sposob vy'zhivaniya Pinus sylvestris L. na texnogenno zagryaznennoj territorii [Life state change as a way of survival of Pinus sylvestris L. on the technogenically polluted territory]. Principy' e'kologii =Principles of Ecology. 2020; 2: 40-47. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44527120>
8. Kuznecova N.F. Vliyanie texnogenogo zagryazneniya i zasuxi na generativnuyu sferu lesostepny'x populyacij Pinus sylvestris L. [Influence of anthropogenic pollution and drought on the generative sphere of forest-steppe populations of Pinus sylvestris L.] Xvojny'e boreal'noj zony'= Conifers of the boreal zone. 2022; XL; 6: 502-508. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-6-502-508>
9. Kuznecova N.F. Generativnaya sfera sosny' oby'knovennoj kak indikator klimaticheskij deter-minirovannoj smeny' zhiznenny'x sostoyanij populyacij [Generative sphere of common pine as an indicator of climatically determined change of life states of populations]. Lesovedenie= Forest Science. 2023; 3: 244-254. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114823030063>
10. Mixajlova M.I., Chernyshov M. P., Rebko S. V. O luchshix geoe'kotipax sosny' oby'knovennoj (Pinus sylvestris L.) dlya iskusstvennogo lesovosstanovleniya [About the best geocotypes of common pine (Pinus sylvestris L.) for artificial reforestation] Lesotexnicheskij zhurnal=Forest Engineering Journal. 2023; 13; 4(52): 58-71. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/4>

11. Nakvasina E.N., Prozherina N.A., Chuprov A.V. Formirovanie shishek sosny` oby`knovennoj (Pinus sylvestris L.) v usloviyax izmeneniya klimata [Formation of cones of the common pine (Pinus sylvestris L.) under conditions of climate change]. Lesnoj vestnik = Forest Bulletin. 2023; 27; 4: 36-46. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-4-36-46>
12. Novikova T.P., Maly`sheva V.I., Petrishhev E.P. Vliyaniye klimaticheskogo indeksa gradusodnej na vitalitet 3-letnix seyancev sosny` oby`knovennoj iz sortirovanny`x po spektrometricheskim svoystvam semyan [Influence of climatic index of degree days on the vitality of 3-year-old seedlings of common pine from seeds sorted by spectrometric properties] Lesotekhnicheskij zhurnal= Forest Engineering Journal. 2022; 12; 1(45): 110-118. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9>
13. Serdyukova A.P. Ocenka obshhego sostoyaniya i semennoj produktivnosti Pinus sylvestris L. v razny`x klimaticheskix zonax Voronezhskoj oblasti [Evaluation of the general condition and seed productivity of Pinus sylvestris L. in different climatic zones of Voronezh region]. Mezhdunarodny`j zhurnal gumanitarny`x i estestvenny`x nauk =International journal of humanities and natural sciences. 2019; 2: 10-12. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41146360>
14. Serdyukova A.P. Sostoyaniye generativnoj sfery` sosny` oby`knovennoj v usloviyax zasuxi i an-tropogennoj nagruzki stepnoj zony` Voronezhskoj oblasti [State of the generative sphere of the common pine under conditions of drought and anthropogenic load of the steppe zone of the Voronezh region]. Global and Regional Research. 2020; 2; 4: 163-168. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44574676>
15. Smirnov A.I., Orlov F.S., Vasil`ev S.B., Aksenov P.A., Nikitin V.F. Obrabotka nekondicionny`x semyan sosny` Banksa (Pinus banksiana Lamb.) i sosny` oby`knovennoj (Pinus sylvestris L.) nizkochastotny`m e`lektromagnitny`m polem [Treatment of substandard seeds of Banks pine (Pinus banksiana Lamb.) and common pine (Pinus sylvestris L.) by low-frequency electromagnetic field]. Lesnoj vestnik= Forest Bulletin. 2020; 24; 5: 59-65. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-5-59-65>
16. Tarxanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Yu.E. Osobennosti adaptatsii razny`x form sosny` oby`knovennoj v usloviyax dlitel`nogo izby`tochnogo uvlazhneniya pochv [Features of adaptation of different forms of common pine in conditions of long-term excessive soil moistening]. Izv. vuzov. Lesn. Zhurn =Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 2021; 2: 30-44. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-30-44>
17. Probability theory and mathematical statistics: textbook / compiled by N. L. Margolina, K. E. Shiryaev. N. L. Margolina, K. E. Shiryaev. Kostroma: Kostroma State University, 2022; 124 p. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50510500>
18. Chuprov A.V., Nakvasina E.N., Prozherina N.A. Izmenchivost` shishek sosny` oby`knovennoj (Pinus sylvestris L.), proizrastayushhej v geograficheskix kul`turax Arxangel`skoj oblasti [Variability of pine cones (Pinus sylvestris L.), growing in geographical cultures of the Arkhangelsk region]. Lesnoj vestnik = Forestry Bulletin. 2021; 25; 3: 24-33. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-24-33>
19. Yarmishko V.T., Ignat`eva O.V. Soobshhestva Pinus sylvestris L. v texnogennoj srede na Evropejskom Severe Rossii: struktura, osobennosti rosta, sostoyaniye. [Pinus sylvestris L. communities in the anthropogenic environment in the European North of Russia: structure, growth features, state]. Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Forestry Journal. 2021; 3: 44-55. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20210305>
20. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Babich N.A., Bryntsev V.A. Differentiation of plus trees of scots pine by xylem conditions. Russian Forestry Journal. 2023; 4(394): 9-25. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-9-25>
21. Yelkenova B.Z., Beisenova R.R., Karipbayeva N.Sh., Polevik V.V. The influence of atmospheric pollution on the growth and developmetr of pine in the conditions of the Irtysh Semipalatinsk Region. Bulletin of the Karaganda university. Biology. Medicine. Geography Series. 2020; 98; 2: 73-78. DOI: <https://doi.org/10.31489/2020BMG2/73-78>

## Сведения об авторах

✉ *Скок Анна Витальевна* – канд. биол. наук, доцент, заведующий кафедрой ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства, *ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет»*, проспект Станке Димитрова, 3, г. Брянск, Российская Федерация, 241037, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1128-8102>, [s.anna.v@mail.ru](mailto:s.anna.v@mail.ru).

*Скок Андрей Александрович* – аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства, *ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет»*, проспект Станке Димитрова, 3, г. Брянск, Российская Федерация, 241037, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9035-107X>, [andreyskok5@mail.ru](mailto:andreyskok5@mail.ru).

*Сорокопудов Владимир Николаевич* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор по специальности «Ботаника», главный научный сотрудник, *ФГБНУ Всероссийский научно — исследовательский институт лекарственных и ароматических растений*, улица Грина, 7, г. Москва, Российская Федерация, 117216, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0133-6919>, [sorokopud2301@mail.ru](mailto:sorokopud2301@mail.ru).

## Information about the authors

✉ *Anna V. Skok* – Cand. Sc. (Biology), Assistant professor, Associate Professor Departments of Landscape Architecture and Landscape construction, Federal State Budget Educational Institutional of Higher Education «Bryansk Sate Technological Univetsity of Engineering», 3, Stanke Dimitrov Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-1128-8102, [s.anna.v@mail.ru](mailto:s.anna.v@mail.ru).

*Andrey A. Skok* – graduate student Departments of Landscape Architecture and Landscape construction Federal State Budget Educational Institutional of Higher Education «Bryansk Sate Technological Univetsity of Engineering», 3, Stanke Dimitrov Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9035-107X>, [andreyskok5@mail.ru](mailto:andreyskok5@mail.ru).

*Vladimir N. Sorokopudov* – Doctor of Agriculture, Professor; FGBNU All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants Grina street, 7, Moscow 117216, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0133-6919>, [sorokopud2301@mail.ru](mailto:sorokopud2301@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/12>

УДК 630:504.05+581.5



## Экологическое состояние почвенного и растительного покрова лесопарка им. Ю.А. Гагарина г. Тюмени

Виктор А. Боев<sup>1</sup>, v.a.boev@utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2491-8274>

Виктория В. Иеронова<sup>1</sup> ✉ v.v.ieronova@utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5404-709X>

Александр С. Петухов<sup>1</sup>, a.s.petukhov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2906-174X>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», 625003, ул. Володарского, 6, г. Тюмень, 625003, Российская Федерация

**Аннотация.** Лесопарки в городах выполняют ряд важных защитных и рекреационных функций. Однако интенсивное антропогенное воздействие городской среды может привести к деградации лесных парковых биогеоценозов и снизить их способность в создании благоприятной экологической обстановки на занимаемой ими территории. Целью работы являлось определение ключевых факторов, влияющих на экологическое состояние почвы и растительности лесопарка им. Ю.А. Гагарина, что позволит разработать рекомендации по их сохранению. Впервые проведен агрохимический анализ почв лесопарка в условиях городской среды юга Тюменской области. Также определено содержание подвижных форм ряда микроэлементов (Pb, Cd, Cu, Ni) методом атомно-эмиссионной спектрофотометрии. Изучение растительного покрова выполнено с использованием метода пробных площадей. В результате проведенных исследований было установлено, что pH почв лесопарка превышает фоновые значения в 1,6 - 1,8 раз и находится в пределах 5,5 - 7,2. Отмечено высокое содержание органического вещества, массовая доля которого в 1,5 - 4,6 раз больше показателей соответствующих природных аналогов. Содержание подвижных форм всех исследованных микроэлементов в почвах лесопарка превышало фоновые значения, но было ниже ПДК, что связано с отсутствием в городе Тюмени мощных источников атмосферных выбросов изученных металлов. Жизненное состояние изученных деревьев преимущественно можно охарактеризовать как «здоровое» или «ослабленное». Установлено, что рекреационная нагрузка оказывает наиболее заметное влияние на живой напочвенный покров и естественное лесовозобновление. На одном из изученных участков парка отмечена трансформация ярусной структуры фитоценоза в результате распространения инвазивного вида яблоня ягодная (*Malus baccata* (L.) Borkh.). Результаты исследования могут быть использованы для формирования рекомендаций по снижению рекреационной нагрузки, сохранению природной структуры фитоценозов и экологических функций исследованного лесопарка.

**Ключевые слова:** лесопарк, почвы городских парков, гумус, микроэлементы, жизненное состояние древостоев, городская среда, антропогенная нагрузка, рекреация

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Боев В. А. Экологическое состояние почвенного и растительного покрова лесопарка им. Ю.А. Гагарина г. Тюмени/ В.А. Боев, В.В. Иеронова, А.С. Петухов // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 188-205. – Библиогр.: с. 201-205 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/12>.

*Поступила* 24.12.2024. *Пересмотрена* 21.01.2025. *Принята* 07.02.2025. *Опубликована онлайн* 24.03.2025.

## Ecological state of soil and vegetation cover of Yuri Gagarin Urban Forest in Tyumen

Viktor A. Boev<sup>1</sup>, v.a.boev@utmn.ru,  <https://orcid.org/0009-0009-2491-8274>

Victoriia V. Ieronova<sup>1</sup> ✉ v.v.ieronova@utmn.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-5404-709X>

Alexander S. Petukhov<sup>1</sup>, a.s.petukhov@utmn.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2906-174X>

<sup>1</sup>Tyumen State University, 625003, Tyumen, 6, Volodarsky street, 625003, Russian Federation

**Abstract.** Urban forest parks fulfill several pivotal protective and recreational functions. Nevertheless, the intense anthropogenic impact of the urban environment can result in the degradation of forest park biogeocenoses and reduce their capacity to establish a favorable ecological situation within the territory they occupy. This study aims to determine the key factors influencing the environmental state of the soil and vegetation in the Yu.A. Gagarin forest park, thereby facilitating the development of recommendations for their conservation. The study represents an inaugural agrochemical analysis of forest park soils within the urban environment of the south of Tyumen Region, complemented by the assessment of the content of mobile forms of some microelements. The content of mobile forms of a number of microelements (Pb, Cd, Cu, Ni) was also determined by atomic emission spectrophotometry. The study of vegetation cover was carried out using the sample plot method. The study revealed that the forest park soils exhibit a pH level that exceeds the background values by 1.6 to 1.8 times, with a range of 5.5 to 7.2. Additionally, a notable finding was the high content of organic matter, which was observed to be 1.5 to 4.6 times higher compared to the levels found in natural analogs. The content of mobile forms of all studied microelements in the soils of the forest park exceeded the background values. Still, it was below the MAC, which is due to the absence of large sources of atmospheric emissions of the studied metals in Tyumen. The vital state of the studied trees can mainly be characterized as "healthy" or "weakened". The findings indicate that the recreational load has the most noticeable effect on the living soil cover and natural reforestation. In one of the areas of the park under study, a transformation of the storeyed structure of the phytocenosis was observed, resulting from the spread of the invasive *Malus baccata* (L.) Borkh. The results of the study can be used to formulate recommendations for reducing the recreational load, thereby preserving the natural structure of phytocenoses and the ecological integrity of the park.

**Keywords:** forest park, soils of city parks, humus, microelements, category sanitary state, urban environment, anthropogenic load, recreation

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Boev V.A., Ieronova V.V., Petukhov A.S. (2025). Ecological state of soil and vegetation cover of Yuri Gagarin Urban Forest in Tyumen. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 188-205 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/12>.

*Received* 08.12.2024. *Revised* 11.02.2025. *Accepted* 05.03.2025. *Published online* 24.03.2025.

## Введение

Непрерывный рост городов, в которых сегодня проживают более половины населения Земли (56%) приводит к усилению давления на все компоненты урбоэкосистем и прежде всего на природные системы, которые являются важной составляющей устойчивости городских территорий [1, 2].

Как показали многочисленные исследования, городские лесопарки выполняют целый ряд функций, оказывающих положительное воздействие на экологическую обстановку на урбанизированных территориях. В работах Н.Д. Ананьева (2023) [3] и V.I. Vasenev (2023) [4] указано, что почвы парков участвуют в поддержании микроклимата, регулировании поверхностного стока, а также могут снижать загрязнение атмосферного воздуха. Растениям лесопарков принадлежит целый ряд защитных, санитарно-гигиенических, водоохраных и рекреационных функций. X. Wang, (2022) [5], J. Costa (2024) [6] и J. Yan (2024) [7] отмечают, что при этом почвы и растительность городских парков подвергаются разным видам антропогенного воздействия, таким как выбросы автомобильного транспорта и промышленных предприятий, наличие строительного и другого мусора, а также привозных грунтов и удобрений.

Для почв лесопарков и городских парков может быть характерна мозаичность, связанная с разными формами землепользования. Кроме антропогенного воздействия на свойства и химический и состав почв городских парков влияние оказывают факторы природной среды и растительность.

Вследствие перечисленных воздействий могут меняться физико-химические характеристики почв городских парков, в том числе рН почвенного раствора и содержание органического углерода. При этом рН почвенного раствора, как правило увеличивается. В ряде исследований выявлено, что содержание гумуса в верхних горизонтах почв может возрасти до 5–8% и более как видно из работы А.Ю. Полякова, 2019 [8].

Значительную роль в экологическом состоянии почвенного и растительного покрова городских парков могут играть тяжелые металлы, которые попадают сюда из различных источников антропогенного происхождения (атмосферные выбросы про-

мышленных предприятий, источников теплоснабжения и автомобильного транспорта), как следует из работ A.S. Vega (2022) [9], Y. Wu (2022) [10] и R. Zhu (2025) [11]. Ряд исследователей отмечают, что тяжелые металлы могут накапливаться в высоких концентрациях в почвах и пыли городских парков, что способствует повышению их биодоступности и увеличивает риск для здоровья человека. Q. Han (2020) [12], Z. Han (2024) [13]. Микроэлементы также оказывают значительное влияние на бактериальные почвенные биоценозы [14].

Помимо загрязнения природных сред, одним из основных видов нагрузки на городские леса, является рекреационная нагрузка, снижающая качественное состояние растительного покрова и вызывающая переуплотнение почв, вследствие прохождения по территории парков многочисленных посетителей [15, 16].

Ухудшение состояния фитоценозов создает благоприятные условия для проникновения в них чужеродных видов [17]. Тишкина Е.А. (2024) [18] отмечают, многие инвазивные виды, внедряющиеся в биоценозы, могут быть видами-трансформерами, способными значительно преобразовывать структуру растительных сообществ, а S.P. Singh Yadav (2024) [19] говорят в своих работах о том, что инвазии снижают видовое разнообразие и вытесняют местные виды. Особую роль, по данным Кучеров И.Б. (2021) [20], в распространении таких видов играют птицы. Воздействие воздействия всего спектра неблагоприятных факторов городской среды может ухудшаться жизненное состояние лесопарковых древостоев. Данный параметр является комплексным показателем, который позволяет делать выводы о влиянии условий произрастания на жизнедеятельность и функционирование растений Уразгильдин Р.В. (2021) [21]. В связи с чем, актуальным является вопрос оценки и мониторинга экологического состояния почвенных и растительных ресурсов парковых зон городов [22].

Город Тюмень отличается высокой степенью озеленения: на его территории насчитывается 42 парка и сквера, которые выполняют важные рекреационные функции. К их числу относятся региональные памятники природы – лесопарк имени Ю.А. Га-

гарина и лесопарк «Затюменский». Лесопарки представляют собой интересный объект для изучения влияния антропогенного воздействия на почву и растительность на урбанизированной территории. Такие исследования позволяют оценить изменения свойств почв и растительности, разработать мониторинговые мероприятия и меры по улучшению экологической ситуации в городских лесах.

В работе представлены результаты исследования экологической обстановки в лесопарке имени Ю.А. Гагарина, которые являются частью исследований экологической обстановки в лесопарках города Тюмени. Лесопарк имени Ю.А. Гагарина находится под воздействием атмосферных выбросов промышленных предприятий, объектов теплоснабжения и автомобильных магистралей с напряженным движением, что может обуславливать накопление в почвах парка изучаемых микроэлементов. Свинец, кадмий и никель являются широко распространенными загрязнителями почв и растений. Медь напротив отличается низким содержанием в серых лесных и дерново-подзолистых почвах юга Тюменской области, что может оказывать негативное влияние на развитие растений. Также изучаемая территория испытывает значительную рекреационную нагрузку.

Целью исследования является оценка экологического состояния растительного покрова и почв на территории лесопарка имени Ю.А. Гагарина.

### Материалы и методы

Объектом исследования является лесной биогеоценоз на территории памятника природы регионального значения «Лесопарк им. Ю.А. Гагарина» г. Тюмень. Предмет исследования – экологическое состояние почвенного и растительного покрова, а также их изменения под воздействием антропогенных факторов. Координаты центральной точки объекта 57°10'24" с.ш. и 65°03'06" в.д.

Памятник природы расположен в черте г. Тюмени на левом коренном берегу р. Туры. С севера ограничен Тобольским трактом, с юга – поймой р. Туры, с запада – линией железной дороги, с востока – пос. Мыс. Площадь парка составляет 104,8 га. На 40% общей лесопокрытой площади произрастает

сосна, на 60% - береза повислая. Лесные биогеоценозы представлены чистыми березняками и хвойным лесом. Средний возраст деревьев составляет 70 лет. По опушке леса вдоль поймы попадаются и 100-120-летние деревья, что подтверждает принадлежность данного лесного массива к лесам коренного типа.

В качестве фоновой территории нами был выбран Тюменский государственный заказник (53 585 га), который в наибольшей степени соответствует всем необходимым условиям и имеет на своей территории участки с почвами и растительностью, подобным тем, что находятся в изучаемом лесопарке. Исходными почвами в лесопарке им. Ю.А. Гагарина являются дерново-подзолистые и серые лесные. Заказник расположен в пределах Нижнетавдинского района Тюменской области, в юго-западной части Западно-Сибирской низменности, в системе Тарманского, озерно-болотного массива, в междуречье среднего течения Тавды и Туры. Расстояние от города Тюмени до фоновой территории составляет более 70 км и сюда не достигают атмосферные выпадения, образующиеся в результате выбросов в атмосферу из городских источников загрязнения [23].

Как на территории лесопарка, так и заказника широко распространены смешанные хвойнолиственные, а также чистые березовые и сосновые леса. Для проведения исследований на территории заказника нами были выбраны участки с аналогичными биогеоценозами.

Исследования проводились в летний период 2023-2024 гг. без учета сезонной динамики. Территория парка условно была разделена на 10 частей, разной степени удаленности от автодороги, в каждой из которых были выделены участки с типичными почвами и растительностью для данной территории, на которых проводился анализ почв и закладывались временные пробные площади (рисунок 1).

Почвенные пробы отбирались методом конверта с поверхности горизонта (0–20 см), общий вес каждой пробы составлял 1–1,5 кг. Отбор проб почвы проводили в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83.

На рис. 1 представлена карта отбора проб почв и оценки растительного покрова.



Рисунок 1. Схема размещения пробных площадок на территории лесопарка имени Ю.А. Гагарина

Figure 1. Layout of test sites on the territory of the forest park named after Y. A. Gagarin

Источник: собственная композиция автора.

Source: author's composition

Подготовка отобранных почвенных проб для химико-аналитических исследований проводилась согласно ГОСТ Р ИСО 11464–2015.

В почвах определяли показатели рН водных почвенных суспензий; содержание гумуса по фотометрическому методу Тюрина в модификации ЦИНАО согласно ГОСТ 26213-2021 с помощью фотоэлектроколориметра КФК-3КМ, а также содержание подвижных форм Pb, Cd, Cu, Ni (экстрагент – ацетатно-аммонийный буфер с рН-4,8). Содержания тяжелых металлов было определено в лаборатории Центра коллективного пользования «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» Тюменского государственного университета при помощи атомно-эмиссионного спектрофотометра с индуктивно связанной плазмой Plasma Quant PQ 9000.

Для исследования состояния растительного покрова использовался метод пробных площадей с применением стандартных методик [23]. При описании живого напочвенного покрова регистрировались следующие параметры растений – вид, проективное покрытие, жизненность и характер размещения на пробной площади. Для древостоя оценивалась сомкнутость крон, а также проводился сплошной пересчет всех деревьев с определением их морфометрических показателей (высота; диаметр на уровне 1,3 м). Деревья были распределены по ступеням толщины. Все изученные деревья оценивались

по категориям санитарного состояния согласно нормативному документу, действующему в настоящее время [24]. На основе полученных результатов определялось состояние древостоя. Для этого использовалась следующая шкала значений индекса жизненности: 1-1,5 здоровый древостой; 1,6-2,5 ослабленный древостой; 2,6-3,5 сильно ослабленный древостой; 3,6-4,5 усыхающий; 4,6 и более сухостой.

Полученные данные обрабатывались общепринятыми статистическими методами с помощью программ Excel.

## Результаты

В ходе исследований нами были определены актуальная рН почвенного раствора; содержание органического вещества (гумуса) в почвах лесопарка, а также содержание подвижной формы (экстрагент – ацетатно-аммонийный буфер с рН-4,8).

Таблица 1

Показатели pH почв лесопарка имени Ю.А. Гагарина

Table 1

pH indicators of forest park soils named after Y. A. Gagarin

Номер площадки опробования Test site number	Значение pH водной вытяжки pH value of aqueous extract	Характеристика среды Characteristics of the environment
1	6,1	Слабокислая среда   Slightly acidic environment
2	6,8	Слабокислая среда   Slightly acidic environment
3	6,2	Слабокислая среда   Slightly acidic environment
4	5,5	Кислая среда   Acidic environment
5	6,3	Слабокислая среда   Slightly acidic environment
6	6,4	Слабокислая среда   Slightly acidic environment
7	7,2	Нейтральная среда   neutral environment
8	6,5	Слабокислая среда   Slightly acidic environment
9	7,1	Нейтральная среда   neutral environment
10	6,2	Слабокислая среда   Slightly acidic environment
Средняя   Average	6,4	-

Источник: собственная композиция автора.

Source: author's composition

Таблица 2

Содержание органического вещества в почвах лесопарка

Table 2

Content of organic matter in forest park soils

№ площадки отбора Sampling site no	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Содержание органического веществ / Organic matter content, (%)	10,7	5,9	9,4	7,4	7,9	4,5	10,9	8,5	10,6	13,8

Источник: собственная композиция автора.

Source: author's composition

Таблица 3

Содержание подвижной формы Pb, Cd, Cu, Ni в мг\кг в почвах лесопарка

Table 3

Content of mobile forms of Pb, Cd, Cu, Ni in mg/kg in forest park soils

Номер площадки опробования Test site number	Pb	Cd	Cu	Ni
1	2,1	0,05	0,4	1,9
2	0,3	0,05	1,9	0,7
3	0,9	0,03	0,2	1,3
4	0,4	0,03	0,2	0,5
5	0,3	0,02	0,2	0,2
6	0,3	0,02	0,2	0,3
7	0,9	0,03	0,2	1,1
8	0,9	0,03	0,2	0,8
9	1,5	0,03	0,3	0,7
10	0,8	0,04	0,2	1,5

Размах Score	0,3 - 2,1	0,03-0,05	0,2-1,9	0,2-1,9
Среднее Average	0,9	0,04	0,4	0,9
Фон Background	0,23	0,04	0,12	1,71
ПДК   maximum permissible concentration	6,0	Отсутствует   absent	3,0	4,0

Источник: собственная композиция автора.

Source: author's composition

Таблица 4

Основные характеристики древостоя

Table 4

Main characteristics of the tree stand

№	Состав древостоя Composition of the forest stand	Высота Height		Диаметр Diameter		Сомкнутость крон Crown density	Категория состояния Condition category	
		x+m <sub>x</sub> , м   m	CV, %	x+m <sub>x</sub> , см   cm	CV, %			
1	10Б   10В	24,5±0,4	6,3	30,2±4,4	23,0	0,6	1,80/Ослабленный	Weakened
2	10Б   10В	27,5±0,6	6,5	26,7±1,7	32,5	0,3	1,64/Ослабленный	Weakened
3	10Б   10В	27,3±0,4	7,0	25,3±1,1	21,5	0,5	2,12/Ослабленный	Weakened
4	9С1Б  9В1Р	22,9±0,6	15,8	22,9±0,9	26,3	0,7	1,38/Здоровый	Healthy
5	10С   10В	25,5±1,1	12,2	31,3±1,9	30,8	0,6	1,60/Ослабленный	Weakened
6	10С   10В	24,7±0,7	11,4	34,8±1,6	23,2	0,7	1,52/Здоровый	Healthy
7	10Б   10В	23,8±0,6	5,8	28,2±1,4	25,2	0,7	1,96/Ослабленный	Weakened
8	10С   10В	27,1±0,9	11,3	41,8±2,5	29,9	0,6	1,96/Ослабленный	Weakened
9	10Б   10В	23,6±0,7	9,4	37,6±1,0	25,2	0,5	1,76/Ослабленный	Weakened
10	10Б   10В	27,0±0,6	5,4	31,2±1,3	21,4	0,7	1,96/Ослабленный	Weakened

Источник: собственная композиция автора.

Source: author's composition

Было проведено распределение древостоя сосны обыкновенной и березы повислой по 4-сантиметровым ступням толщины. Результаты данных исследований представлены на рис. 2 и 3.

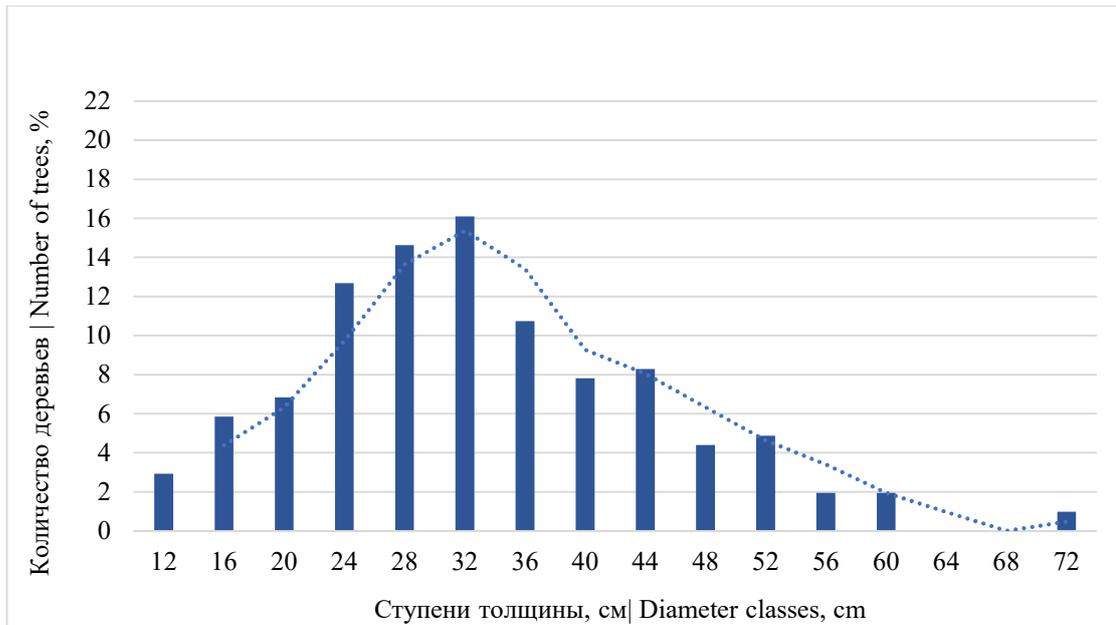


Рисунок 2. Распределение древостоя *Pinus sylvestris* по ступеням толщины стволов

Figure 2. Distribution of *Pinus sylvestris* tree stand by trunk thickness levels

Источник: собственная композиция автора.

Source: author's composition Number of trees

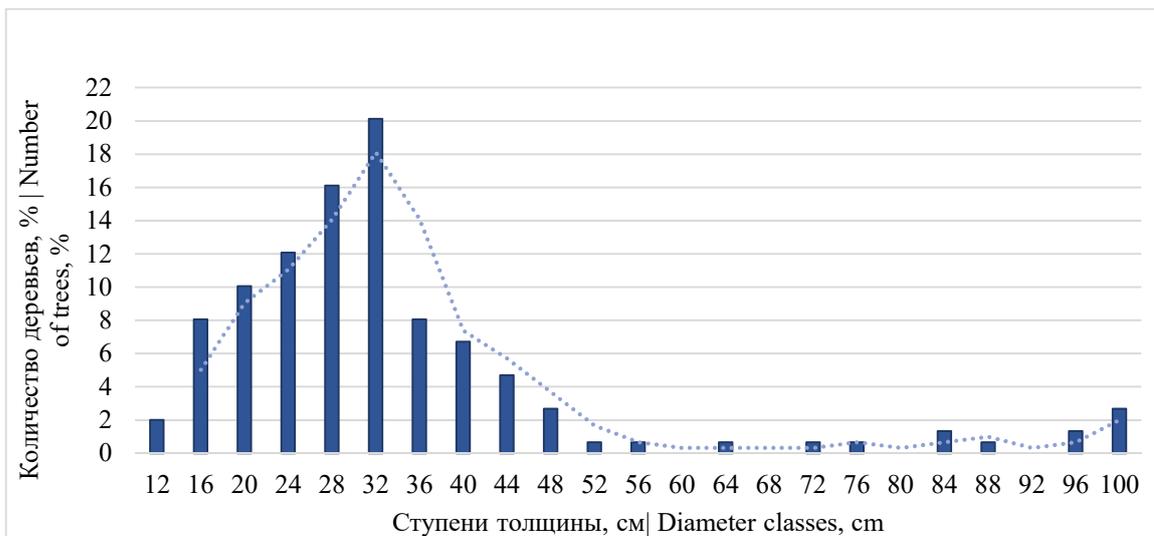


Рисунок 3. Распределение древостоя *Betula pendula* по ступеням толщины стволов

Figure 3. Distribution of *Betula pendula* tree stand by trunk thickness levels

Источник: собственная композиция автора.

Source: author's composition

На рис. 4 приведены результаты по распределению древостоя по категориям санитарного состояния для основных лесообразующих пород.

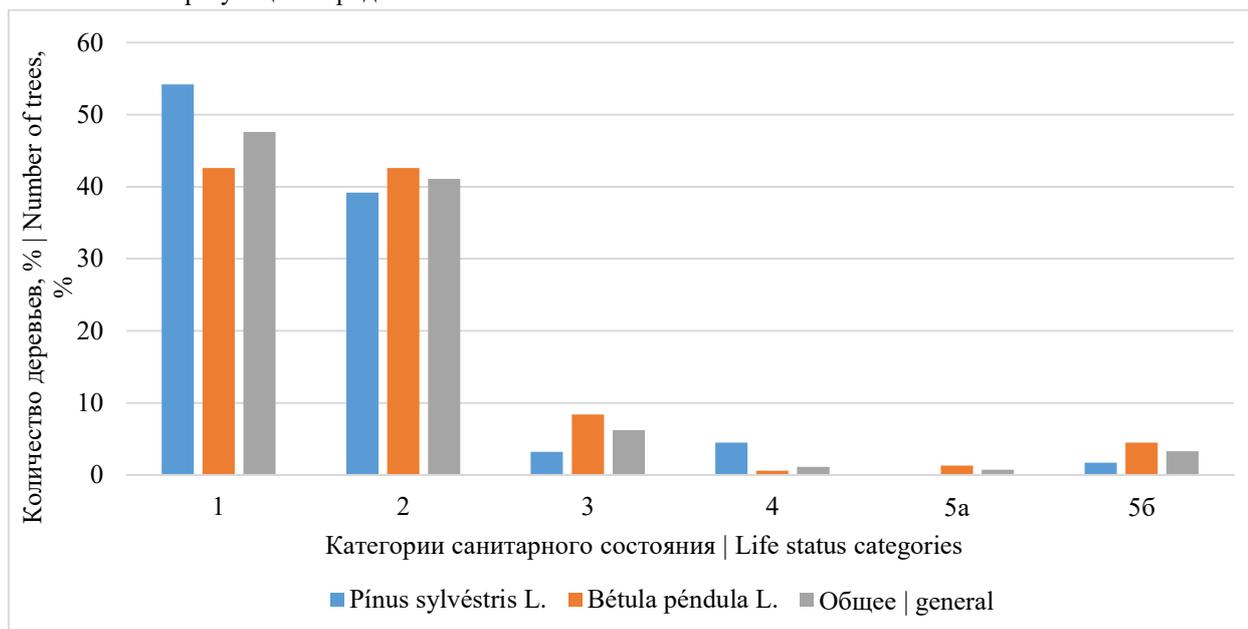


Рисунок 4. Распределение древостоя по категориям санитарного состояния (%)

Figure 3. Distribution of forest stand by life status categories (%)

Источник: собственная композиция автора. Source: author's composition

## Обсуждение

Наибольшее значение рН водной вытяжки было зафиксировано в точке 7,0 – 7,2. Наименьший показатель рН водной вытяжки – на точке 4,0 – 5,5. Среднее значение, согласно приведенным в таблице данным, составляет 6,4, что благоприятно для роста и развития растительности.

Как показывают результаты исследований, приведенные в табл. 1, почвы лесопарка отличаются более значительно более высокими значениями рН, от природных дерново-подзолистых почв характерных для юга Тюменской области, рН которых находится в диапазоне от 3,0 до 4,3.

Увеличение показателя рН почвенного раствора почв лесопарка относительно фоновых почв может быть связано с выпадением на поверхность почв пылевых частиц с распложенных вблизи парка строительных площадок, т.к. многие строительные материалы имеют щелочную реакцию.

По данным таблицы наибольшее содержание гумуса наблюдается в точке 10,0 – 13,8%. Как следует из представленных в табл. 2 данных содержание гумуса в почвах лесопарков колеблется в пределах от 4,5 до 13,8%, среднее значение составляет 9,0%. Это значительно превышает содержание гумуса в дерново-подзолистых почвах фоновых территорий юга Тюменской области, составляющих около 3,0% [30].

Увеличению содержания гумуса в почвах лесопарка возможно способствует характер растительности и ухода.

В ходе выполнения исследований было изучено содержание подвижных форм (экстрагент – ацетатно-аммонийный буфер с рН 4,8) Pb, Cd, Cu, Ni.

По данным табл. 3 содержание подвижных форм свинца колеблется в пределах 0,3 – 2,1 мг/кг. Наибольшее содержания свинца наблюдается в почвах пробной площадки 1 – 2,1 мг/кг, поскольку эта площадка располагается вблизи автомобильной магистрали с интенсивным движением. Источником поступления свинца в почвы на этой территории, вероятно, являются выбросы от автотранспорта.

В начале 2000-х годов в регионе произошел переход автомобильного транспорта на бензин без

добавления тетраэтилсвинца, но может иметь место реликтовое содержание этого элемента, который отличается очень медленным выводом из почвы.

Наименьшее значение содержания подвижных форм свинца наблюдается в почвах площадок 5 и 6 – 0,3 мг/кг, поскольку эти точки располагаются на наибольшем расстоянии от автомобильных магистралей. Среднее значение содержания подвижной формы свинца составляет 0,9 мг/кг, что незначительно превышает фоновые значения, и значительно ниже значения ПДК.

Согласно приведенным в табл. 3 данным, содержание подвижных форм кадмия колеблется в пределах 0,02 – 0,05 мг/кг. Среднее значение – 0,04 мг/кг, что соответствует фоновым значениям. Таким образом, содержание подвижных форм кадмия близко к фоновым вследствие отсутствия источников антропогенного поступления кадмия в почвы парка имени Ю.А. Гагарина.

Как следует из данных табл. 3 содержание подвижных форм меди колеблется в пределах 0,2 – 1,9 мг/кг. Наибольшее содержания меди наблюдается в почвах площадки 2,0 – 1,9 мг/кг, что может быть связано с расположением площадки вблизи полотна автомагистрали. Для большинства почв пробных площадок (7 из 10) содержание подвижной формы меди составляет 0,2 мг/кг. Среднее значение – 0,4 мг/кг, что соответствует фоновым значениям. По сравнению с показателями ПДК для подвижных форм меди среднее содержание подвижных форм меди в пределах парка имени Ю.А. Гагарина значительно ниже.

По данным табл. 3 содержание подвижных форм никеля колеблется в пределах 0,2 – 1,9 мг/кг. Наибольшее содержания никеля наблюдается в почвах пробной площадки 1 – 1,9 мг/кг, которая располагается вблизи автомобильной дороги. Наименьшее значение наблюдается в точке 5 – 0,02 мг/кг. Среднее значение – 0,9 мг/кг, что незначительно ниже фоновых значений и значительно ниже ПДК.

Для выявления зависимости между содержанием подвижных форм Pb, Cd, Cu, Ni и свойствами почвы авторами был проведен корреляционный анализ.

Как следует из представленных данных величины корреляция между рН водной вытяжки и содержанием подвижной формы свинца, кадмия, меди и никеля выражена слабо и составляет 0,1827, 0,0251, 0,2498 и 0,0648 соответственно.

Были также проведены исследования связи между содержанием органического вещества и подвижной формы Pb, Cd, Cu, Ni в почвах лесопарка имени Ю.А. Гагарина.

Была выявлена слабая корреляция между содержанием органического вещества и содержанием подвижной формы Pb, Cd, Cu, Ni соответственно 0,5570, 0,3538, - 0,3471 и 0,7635.

Одним из основных видов антропогенного воздействия на парк, влияющим на жизненное состояние растений, является рекреация. Отмечено, что для живого напочвенного покрова степень его нарушенности напрямую зависит от уровня вытоптанности и развития тропиной сети. На изученных пробных площадях отмечены тропинки с разной степенью дигрессии травяно-кустарничкового яруса. Сильнее всего рекреантами поврежден травяной покров на участках №1, 2, 4 и 9 (до 20-30 % площади). Здесь отмечается общее снижение жизненного состояния травянистых растений и повышение уровня синантропизации флоры. В целом развитие данного яруса различается для древостоев березы и сосны. В березняке он хорошо выражен, проективное покрытие травянистых растений здесь достигает 85-95% и они характеризуются максимальными показателями жизненности (участки №3, 7, 10). В сосняке степень его развития намного ниже, с проективным покрытием растений травяно-кустарничкового яруса от 5 % (участок № 4) до 40 % (участок № 6).

Лесной биоценоз на изученных участках представлен в основном чистыми сосновыми и березовыми древостоями с сомкнутостью крон от 0,5 до 0,7. Исключение составили только участки № 4, где отмечен смешанный состав пород и участок № 2, располагающийся в юго-западной части парка, на котором сомкнутость крон березы не превысила 0,3. В целом с данного края парковой территории характерно наличие редины (рис. 1, табл. 4).

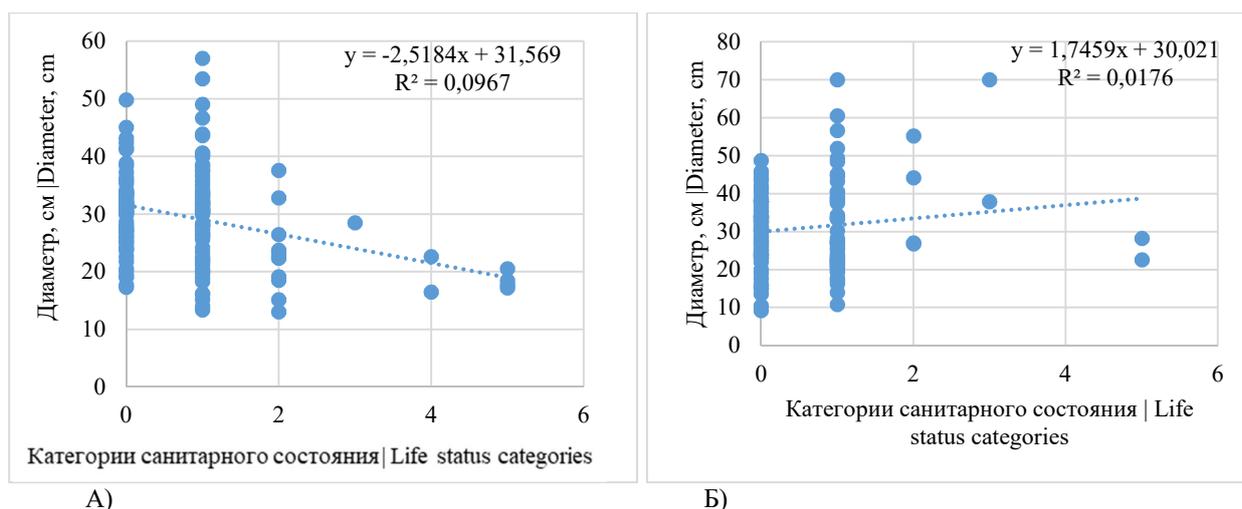
Среднее значение высоты древостоя как в березовом, так и в сосновом древостоях составляет

23-27 м. При этом отмечено, что данный признак имеет среднюю степень изменчивости (CV - 11,3 %-15,8 %) для сосны и слабую для березы (CV<9,4 %). Диаметры стволов на всей изученной территории напротив характеризуются более высокой степенью неоднородности у обеих пород (CV - 21,4-32,5 %).

Анализ результатов распределения изученных древостоев сосны и березы по ступеням толщины, представленных на рис. 2 и 3 позволил выделить некоторые закономерности в их строении. Кривая распределения в обоих случаях имеет одну вершину и смещена влево, что в целом свидетельствует о достаточной устойчивости изученных лесных сообществ. Основная доля деревьев в березняке приходится на значения ступеней толщины от 20 до 32 см, а в сосняке 24 - 36 см.

Необходимо отметить, что сосны с самыми большими диаметрами стволов, возраст которых достигает 120 лет, растут со стороны поймы реки Тура. Эти деревья характеризуются наличием длинных расвесистых ветвей без хвои, расположенных на небольшой высоте. Такая широкая крона у сосны обыкновенной формируется, как правило, только на открытом пространстве. Таким образом, можно предположить, что изучаемые лесные биогеоценозы формировались на луговых сообществах. Возможно развитая травянистая растительность в прошлом явилась причиной формирования достаточно большого количества гумуса и обусловила его современную высокую концентрацию в изученных почвенных образцах.

Древостой, как и живой напочвенный покров, испытывает влияние рекреационной нагрузки. Однако оценить интенсивность такого воздействия сложно. Практически весь сухой убирается в ходе санитарных рубок, поэтому вне зависимости от степени деградации напочвенного покрова на изученной территории практически отсутствуют деревья 4 и 5 категории санитарного состояния. Также сложно установить взаимосвязь между состоянием деревьев и морфометрическими параметрами, так корреляция показателей жизненности с диаметром стволов не превысила 0,3 (рис. 5).



А)

Б)

Рисунок 5. Линейная корреляция значений диаметра ствола и жизненного состояния *Betula pendula* (А) и *Pinus sylvestris* (Б)

Figure 3. Linear correlation of trunk diameter and vital state *Betula pendula* (А) and *Pinus sylvestris* (Б)

Источник: собственная композиция автора.

Source: author's composition

Анализ распределения древостоя по санитарному состоянию показал, что большая часть приходится на деревья категории «здоровые» и «ослабленные». При этом для березы эти две группы составили равные доли (42,6 %), а для сосны большая часть растений пришлась на группу здоровых растений (54,2 %). Доли растений 3-5 балла были немногочисленны и не превышали 8,4 % (2 балла, береза), либо совсем отсутствовали (рис. 2). Древостой сосны обыкновенной в целом показал большую устойчивость к антропогенному воздействию, характеризуясь самыми низкими индексами жизненного состояния (табл. 1). Так на площадках № 4 и 6 данный параметр составил 1,38 и 1,52 соответственно, что позволяет отнести древостой к категории здорового. Чуть более ослабленное состояние березового леса (индекс жизненного состояния варьировал от 1,64 до 2,12) может объясняться тем фактором, что с северной и западной стороны лесопарка, где он располагается, прилегают автомагистрали с насыщенным автотранспортным потоком. С северной и восточной стороны крупные автодороги и другие источники негативного антропогенного воздействия в непосредственной близости отсутствуют.

Лесовозобновление изученных биогеоценозов идет в основном за счет основных лесообразующих пород. Подрост представлен преимущественно сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и березой повислой (*Betula pendula* Roth), редко встречается осина (*Populus tremula* L.) и липа сердцелистная (*Tilia cordata* Mill). В березовом древостое зарегистрирован единичный подрост дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), его происхождение здесь носит антропогенный характер. Отмечено, что естественное возобновление леса на изученной территории происходит неравномерно. Так, для сосновых древостоев отмечаются как участки с большим количеством всходов и интенсивным развитием подроста 1-2 категории жизненности и высотой до 1,0-1,8 м, так и участки с полным отсутствием подроста и минимальным количеством всходов. Полное отсутствие подроста отмечено на двух исследованных пробных площадях № 4 и № 8 с чистыми сосновыми древостоями. На первой площадке наиболее сильно развита тропиновая сеть, а на второй интенсивное развитие яблони ягодной привело к формированию плотного слоя опада, что затрудняет семенное воспроизводство сосны обыкновенной. В целом данный

параметр на территории лесопарка преимущественно определяется уровнем рекреационной нагрузки и наличия окон возобновления в пологе леса.

Подлесок преимущественно представлен рябиной (*Sorbus aucuparia* L.), черемухой (*Padus avium* Mill.), яблоней (*Malus baccata* (L.) Borkh.) и малиной обыкновенной (*Rubus idaeus* L.). Данный ярус хорошо выражен на всех изученных пробных площадях в березовом лесу. На территории, занятой сосновым лесом, подлесок распространен неравномерно, от практически полного отсутствия на участках № 4 и № 5, до сильно развитого на участке № 8 в юго-восточной части парка. Здесь отмечено активное развитие инвазивного вида яблони ягодной, сформировавшей плотный подлесок со сомкнутостью крон почти 100 %. Вследствие чего на данной территории почти полностью исчез напочвенный травяно-кустарничковый ярус. Вероятно, именно развитие яблони ослабило здесь жизненное состояние древостоя сосны, в сравнении с другими изученными участками соснового леса (табл. 4).

Хочется отметить, что распространение инвазивных древесных растений на территории лесопарка вызывает особую тревогу. Помимо яблони ягодной отмечены инвазии следующих потенциально опасных видов: клен ясенелистный (*Acer negundo* L.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), ирга колосистая (*Amelanchier spicata* Lam.). Все эти виды в будущем могут значительно ослабить жизненное состояние как древостоя, так и напочвенного живого покрова, а при неконтролируемом распространении и развитии трансформировать структуру всего фитоценоза. В настоящее время уже имеются участки с кленом ясенелистным под пологом березового леса, расположенные преимущественно в северо-западной части парка. В настоящее время деревья *Acer negundo* еще достаточно молодые и не сильно влияют на структуру изученных лесных сообществ, но по мере развития могут стать серьезным фактором, трансформирующим исходный биоценоз.

### Заключение

На основе анализа полученных в ходе исследования данных, авторы считают, что почвы на территории парка имени Ю.А. Гагарина относятся к типу антропогенно-поверхностно-преобразованных

естественных почв. В почвах парка также отмечено высокое содержание гумуса (от 4,5 до 13 %), что значительно превышает его содержание (1,5-3 %) в фоновых почвах. Возможно это объясняется историей формирования изучаемых биогеоценозов, предположительно сформировавшихся на территории с луговыми сообществами, развитая травянистая растительность которых и явилась причиной формирования достаточно большого количества гумуса. Поскольку высокое содержание органического вещества является важнейшей составляющей плодородия почв, этот фактор может оказывать благоприятное влияние на развитие растений.

Содержание подвижных форм Pb, Cd, Cu, Ni в почвах лесопарка имени Ю.А. Гагарина либо близко к фоновым значениям, либо незначительно превышает их и намного ниже предельно допустимых концентраций этих элементов в почвах.

Наиболее значительным, из изученных тяжелых металлов, является поступление в почвы свинца (0,9 мг/кг), которое почти в 4 раза превышает фоновые значения. Источником данного элемента обычно служат атмосферные выбросы автомобильного транспорта. Однако поступление этого элемента в почвы значительно уменьшилось в 2002 году, в связи с прекращением использования этилированного бензина, следовательно, можно предположить, что в настоящее время его концентрация не будет увеличиваться и останется в пределах ПДК.

Полученные данные впервые позволили установить текущий индекс жизненности древостоев лесопарка им. Ю.А. Гагарина, а также выявить основные угрозы состоянию растительного покрова. Анализ полученных результатов показал, что состояние древостоев лесопарка можно охарактеризовать как «ослабленное» и «здоровое». При этом жизненное состояние древостоя *Pinus sylvestris* L. в сравнении с *Betula pendula* Roth, характеризуются более высокими показателями жизненности. Данный параметр в сосняке варьировал от 1,38 до 1,96, а для березняка размах значений индекса составил 1,64-2,12. Возможно это связано с тем, что березовый лес находится в той части парка, которая граничит с оживленными автомагистралями, в то время как сосновый лес обращен в сторону естественных фитоценозов поймы реки Тура.

Рекреационная нагрузка является одним из основных видов антропогенного воздействия на биогеоценозы лесопарка и оказывает негативное влияние на живой напочвенный покров вследствие вытаптывания его рекреантами. Также отмечено, что участки, подвергающиеся наиболее сильному рекреационному воздействию, характеризовались снижением количества и качества подраста. Установлено, что похожее влияние на изученные фитоценозы оказывает развитие инвазивных видов в подлеске. Так, на одном из участков соснового леса, вследствие обильного распространения яблони ягодной (*Malus baccata* (L.) Borkh.) (сомкнутость крон составила 100 %) отсутствуют всходы и подраст любых лесобразующих пород, а также полностью исчез травяно-кустарничковый ярус. Также в подлеске по всей территории парка отмечены инва-

зии других потенциально опасных видов: клен ясенелистный (*Acer negundo* L.) и ирга колосистая (*Amelanchier spicata* Lam.).

Дальнейшее развитие выделенных инвазивных видов может привести к еще большему ослаблению жизненного состояния древостоя, трансформации и деградации живого напочвенного покрова и других ярусов, а также помешать процессам естественного лесовозобновления. Для предотвращения увеличения количества древесных инвазий в лесопарке считаем необходимым проведение санитарных рубок и осуществление постоянного контроля за их распространением.

Результаты работы могут быть использованы для разработки мероприятий по управлению лесопарками в условиях умеренного антропогенного влияния.

### Список литературы

1. Крюков В.А., Голубева Е.И. Трансформация природоохранных ограничений национального парка "Лосинский остров" // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2022. – Т. 67(1). – С. 181-198. – DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.110>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48652402>
2. Toledo-Garibaldi M., Puric-Mladenovic D., Smith S.M., Urban forest biotope mapping: A new approach for sustainable forest management planning in Mexico City. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2024; 92: 128205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128205>
3. Ананьева Н.Д. Биофильные элементы (С, N, P) и дыхательная активность микробного сообщества почв лесопарков Москвы и пригородных лесов / Н.Д. Ананьева, Р.Ю. Хатит, К.В. Иващенко [и др.] // Почвоведение. – 2023. – № 1. – С. 102-117. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600780>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50404108>
4. Vasenev V.I., Varentsov D.A., Sarzhanov D.A. Influence of Meso- and Microclimatic Conditions on the CO<sub>2</sub> Emission from Soils of the Urban Green Infrastructure of the Moscow Metropolis. *Eurasian Soil Science*. 2023; 56(9): 1257-1269. DOI: <https://doi.org/10.1134/s106422932360121x>
5. Wang X., Birch G.F., Liu E. Traffic emission dominates the spatial variations of metal contamination and ecological-health risks in urban park soil. *Chemosphere*. 2022; 297: 134155 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134155>
6. Costa J., Furquim S. Aggregation of tropical urban soils in the metropolis of São Paulo, southern Brazil. *Canena*. 2025; 249: 108-681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108681>
7. Yan J., Zhang J., Wang Q., He X., Zheng H. Stand structural characteristics determine ecosystems multifunctionality of urban forests in Changchun City, Northeast China. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2025; 104: 128647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128647>
8. Полякова А.Ю. Агрехимические свойства почв Дворцового парка Гатчины // Агрофизика. – 2019. – № 2. – С. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2019.02.05>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38202263>
9. Vega A.S., Arce G., Rivera J.I., Acevedo S.E., Reyes-Paecke S., Bonilla C.A., Pastén P. A comparative study of soil metal concentrations in Chilean urban parks using four pollution indexes. *Applied Geochemistry*. 2022; 141: 105230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105230>

10. Wu Y., Liu Q., Ma J., Zhao W., Chen H., Qu Y. Antimony, beryllium, cobalt, and vanadium in urban park soils in Beijing: Machine learning-based source identification and health risk-based soil environmental criteria. *Environmental Pollution*. 2022; 293(11): 118554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118554>
11. Zhu R., Ren Z., Parajuli M., Yuan Y., Yang Q., Yu A. Assessment of potential ecological and health risk of potentially toxic elements in roadside green areas and urban parks *Journal of Environmental. Chemical Engineering*. 2025; 13(10): 115045 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115045>
12. Han Q., Wang M., Cao J., Gui C., Liu Y., He X., He Y., Liu Y. Health risk assessment and bioaccessibilities of heavy metals for children in soil and dust from urban parks and schools of Jiaozuo, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020; 191(12): 110157 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110157>
13. Han Z., Huijuan W, Huang X., Song X., Shu Y., Wu J., Sun J., Li R., Fan Z. Determination of soil environmental criteria for high-risk trace metals in urban park soils using improved CLEA model. *Journal of Hazardous Materials*. 2024; 480: 136001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136001>
14. Liu W., Zhang X., Zhang W., He S., Luo S., Han J., Shen D. Metal-driven bacterial community variation in urban and suburban park soils of Shanghai, China. *European Journal of Soil Biology*, 2023; 115: 103475. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2023.103475>
15. Vieillard C., Vidal-Beaudet L., Dagois R., Lothode M., Vadepiet F., Gontier M., Schwartz C., Ouvrard S. Impacts of soil de-sealing practices on urban land-uses, soil functions and ecosystem services in French cities. *Geoderma Regional*. 2024; 38: e00854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00854>
16. Исаченко Т.Е., Исаченко Г.А., Озерова С.Д. Оценка рекреационной нарушенности и регулирование нагрузок на особо охраняемых природных территориях Санкт-Петербурга//Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2020. – 65 (1). – С.16–32. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.102>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42905001>
17. Егوشин А.В. Моделирование пространственного распределения наиболее агрессивных чужеродных видов древесных растений на юге Черноморского побережья Краснодарского края, на примере *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud и *Catalpa ovata* G. Don//Российский журнал биологических инвазий. – 2024. – Т. 17(3). – С. 86-101. DOI: <https://doi.org/10.35885/1996-1499-17-3-086-101>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69158373>
18. Тишкина Е.А., Семкина Л.А., Шевелина И.В. Особенности внедрения *Acer negundo* L. в лесные парки г. Екатеринбурга//Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. – 2024. – Т. 19(2). – С. 302-313. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2024-19-2-302-313>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69822281>
19. Singh Y.S.P., Mehata D.K., Pokhrel S., Ghimire N.P., Gyawali P., Katel S. Invasive alien plant species (Banmara): Investigating its invasive potential, ecological consequences on biodiversity, and management strategies. Umesh Timilsina *Journal of Agriculture and Food Research*. 2024; 15: 101031. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101031>
20. Кучеров И.Б. Об инвазиях орнитохорных кустарников на особо охраняемых природных территориях Санкт-Петербурга и Ленинградской области//Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2021. – №54. – С. 21-44. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/54/2>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46342842>
21. Уразильдин Р.В., Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Часть 4. Влияние на жизненное состояние и выработку адаптивных стратегий древостоев // Биосфера. – 2021. – Т. 13(4). – С. 206-223. DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i4.581>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47567453>.
22. Лихачева Э.А., Некрасова Л.А. Городская среда: экологические проблемы и управление природно-антропогенной системой (с позиций экологической геоморфологии)//Известия Российской академии наук. Серия

географическая. – 2020. – № 4. – С. 577-587. DOI: <https://doi.org/10.31857/S258755662004010X>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43159610>

23. Полевая геоботаника. Акад. наук СССР. Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова; Под общ. ред. [и с предисл.] Е. М. Лавренко и А.А. Корчагина. - Москва; Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР. [Ленингр. отд-ние], 1964. - 3 т. 524 с.

24. Правила санитарной безопасности в лесах: утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 декабря 2020 г. № 2047. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012110016?index=4>

#### References

1. Kryukov V.A., Golubeva E.I. *Transformatsiya prirodookhrannykh ogranichenii natsional'nogo parka "Losinyi ostrov"*. [Elk Island (Losinyi Ostrov) national park: transformation of regulations in urban environment]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle=Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2022, 67(1): 181-198. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.110>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48652402>
2. Toledo-Garibaldi M., Puric-Mladenovic D., Smith S.M., Urban forest biotope mapping: A new approach for sustainable forest management planning in Mexico City. Urban Forestry & Urban Greening. 2024, 92: 128205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128205>
3. Anan'eva N.D., Khatit R.Yu., Ivashchenko K.V. *Biofil'nye elementy (S, N, R) i dykhatel'naya aktivnost' mikrobnogo soobshchestva pochv le-soparkov Moskvy i prigorodnykh lesov* [Soil biophilic elements (C, N, P) and microbial activity in forest parks of Moscow and suburban forests]. Pochvovedenie= Eurasian Soil Science 2023, 1: 102-117. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22600780>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50404108>
4. Vasenev V.I. Influence of Meso- and Microclimatic Conditions on the CO<sub>2</sub> Emission from Soils of the Urban Green Infrastructure of the Moscow Metropolis / V.I. Vasenev, M.I. Varentsov, D.A. Sarzhanov [et al.]. Eurasian Soil Science. 2023, 56(9): 1257-1269. DOI: <https://doi.org/10.1134/s106422932360121x>
5. Wang X., Birch G.F., Liu E. Traffic emission dominates the spatial variations of metal contamination and ecological-health risks in urban park soil. Chemosphere. 2022, 297: 134155 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134155>
6. Costa J., Furquim S. Aggregation of tropical urban soils in the metropolis of São Paulo, southern Brazil. Catena. 2025, 249: 108-681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108681>
7. Yan J., Zhang J., Wang Q., He X., Zheng H. Stand structural characteristics determine ecosystems multifunctionality of urban forests in Changchun City, Northeast China. Urban Forestry & Urban Greening. 2025, 104: 128647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128647>
8. Polyakova A.Yu. *Agrokhimicheskie svoystva pochv Dvortsovogo parka Gatchiny* [Agrochemical properties of the Gatchina Palace park soil]. Agrofizika=Agrophysica. 2019, 2: 32-37. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2019.02.05>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38202263>
9. Vega A.S., Arce G., Rivera J.I., Acevedo S.E., Reyes-Paecke S., Bonilla C.A., Pastén P. A comparative study of soil metal concentrations in Chilean urban parks using four pollution indexes. Applied Geochemistry. 2022, 141: 105230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105230>
10. Wu Y., Liu Q., Ma J., Zhao W., Chen H., Qu Y. Antimony, beryllium, cobalt, and vanadium in urban park soils in Beijing: Machine learning-based source identification and health risk-based soil environmental criteria. Environmental Pollution. 2022, 293(11): 118554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118554>
11. Zhu R., Ren Z., Parajuli M., Yuan Y., Yang Q., Yu A. Assessment of potential ecological and health risk of potentially toxic elements in roadside green areas and urban parks Journal of Environmental. Chemical Engineering. 2025, 13(10): 115045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115045>

12. Han Q., Wang M., Cao J., Gui C., Liu Y., He X., He Y., Liu Y. Health risk assessment and bioaccessibilities of heavy metals for children in soil and dust from urban parks and schools of Jiaozuo, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020, 191(12): 110157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110157>
13. Han Z., Huijuan W., Huang X., Song X., Shu Y., Wu J., Sun J., Li R., Fan Z. Determination of soil environmental criteria for high-risk trace metals in urban park soils using improved CLEA model. *Journal of Hazardous Materials*. 2024, 480: 136001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136001>
14. Liu W., Zhang X., Zhang W., He S., Luo S., Han J., Shen D. Metal-driven bacterial community variation in urban and suburban park soils of Shanghai, China // *European Journal of Soil Biology*. 2023, 115: 103475. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2023.103475>
15. Vieillard C., Vidal-Beaudet L., Dagois R., Lothode M., Vade pied F., Gontier M., Schwartz C., Ouvrard S. Impacts of soil de-sealing practices on urban land-uses, soil functions and ecosystem services in French cities. *Geoderma Regional*. 2024, 38: e00854 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00854>
16. Isachenko T.E., Isachenko G.A., Ozerova S.D. *Otsenka rekreatsionnoi narushennosti i regulirovanie nagruzok na osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriyakh Sankt-Peterburga* [Evaluation of recreational disturbance and the regulation of loads on natural protected areas in Saint Petersburg]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*=*Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2020, 65(1): 16–32. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.102>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42905001>
17. Egoshin A.V. *Modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya naibolee agressivnykh chuzherodnykh vidov drevesnykh rastenii na yuge Chernomorskogo poberezh'ya Krasnodarskogo kraja, na primere Paulownia tomentosa (Thunb.) Steud i Catalpa ovata G. Don* [Modeling of spatial distribution of the most aggressive alien species of woody plants (*Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud and *Catalpa ovata* D. Don) in the south of the Black Sea coast of Krasnodar territory]. *Rossiiskii zhurnal biologicheskikh invazii*=*Russian Journal of Biological Invasions*. 2024, 17(3): 86-101. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35885/1996-1499-17-3-086-101>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69158373>
18. Tishkina E.A., Semkina L.A., Shevelina I.V. *Osobennosti vnedreniya Acer negundo L. v lesnye parki g. Ekaterinburga* [Features of *Acer negundo* L. distribution in forest parks of Ekaterinburg]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo*=*RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2024, 19(2): 302-313. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2024-19-2-302-313>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69822281>
19. Singh Yadav S.P., Mehata D.K., Pokhrel S., Ghimire N.P., Gyawali P., Katel S. Invasive alien plant species (Banmara): Investigating its invasive potential, ecological consequences on biodiversity, and management strategies. *Umesh Timilsina Journal of Agriculture and Food Research*. 2024,15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101031>
20. Kucherov I.B. *Ob invazyakh ornitokhornykh kustarnikov na osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriyakh Sankt-Peterburga i Leningradskoi oblasti* [Invasions of bird-dispersed shrub species in specially protected natural reservations of Saint-Petersburg and Leningrad region]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*.= *Tomsk State University Journal of Biology*. 2021, 54: 21-44. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/54/2>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46342842>
21. Urazgil'din R.V., Kulagin A.Yu. *Tekhnogenez i strukturno-funktsional'nye reaksii drevesnykh vi-dov: pov-rezhdeniya, adaptatsii, strategii. Chast' 4. Vliyanie na zhiznennoe sostoyanie i vyrabotku adaptivnykh strategii drevostoev* [Structural and functional responses of arboreal plants to anthropogenic factors: damages, adaptations and strategies. Part 4. Impact on the conditions and the development of adaptive strategies of forests]. *Biosfera*=*Biosfera*. 2021, 13(4): 206-223. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24855/biosfera.v13i4.581>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47567453>.
22. Likhacheva E.A., Nekrasova L.A. *Gorodskaya sreda: ekologicheskie problemy i upravlenie prirodno-antropogennoi sistemoi (s pozitsii ekologicheskoi geomorfologii)* [Urban environment: ecological problems and natural-anthropogenic system's management (from the perspective of environmental geomorphology)]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*=*Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2020, 4: 577-

587. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S258755662004010X>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43159610>

23. *Polevaya geobotanika* [Field geobotany] Akad. nauk SSSR. Botan. in-t im. V. L. Komarova ; Pod obshch. red. [i s predisl.] E. M. Lavrenko i A.A. Korchagina. - Moskva; Leningrad: Izd-vo Akad. nauk SSSR. [Leningr. otd-nie], 1964. - 3 t.; 524. (In Russ.).

24. *Pravila sanitarnoi bezopasnosti v lesakh: utv. Postanovleniem Pravitel'stva Rossiiskoi Fede-ratsii ot 9 dek-abrya 2020 g. № 2047*. [Sanitary Rules in Forests: approved by the Government Decree of the Russian Federation of December 9th, 2020, No. 2047]. (In Russ.). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012110016?index=4>

### Сведения об авторах

*Боев Виктор Александрович* – канд. биол. наук, доцент кафедры геоэкологии и природопользования ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», ул. Володарского, д.6, г. Тюмень, Тюменская область, 625003, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2491-8274>; e-mail: [v.a.boev@utmn.ru](mailto:v.a.boev@utmn.ru)

✉ *Иеронова Виктория Викторовна* – канд. биол. наук, доцент кафедры геоэкологии и природопользования ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», ул. Володарского, д.6, г. Тюмень, Тюменская область, 625003, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5404-709X>; e-mail: [v.v.ieronova@utmn.ru](mailto:v.v.ieronova@utmn.ru)

*Петухов Александр Сергеевич* – канд. хим. наук, ассистент кафедры органической и экологической химии ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», ул. Володарского, д.6, г. Тюмень, Тюменская область, 625003, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2906-174X>; e-mail: [a.s.petukhov@utmn.ru](mailto:a.s.petukhov@utmn.ru)

### Information about the authors

*Viktor A. Boev* – Cand. Sci (Biol.), Associate Professor, The Department of Geoecology and environmental management, Tyumen State University 625003, Tyumen, 6, Volodarsky street, 625003, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2491-8274>; e-mail: [v.a.boev@utmn.ru](mailto:v.a.boev@utmn.ru)

✉ *Victoriia V. Ieronova* – Cand. Sci (Biol.), Associate Professor, The Department of Geoecology and environmental management, Tyumen State University, 625003, Tyumen, 6, Volodarsky street, 625003, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5404-709X>; e-mail: [v.v.ieronova@utmn.ru](mailto:v.v.ieronova@utmn.ru)

*Alexander S. Petukhov* – Cand. Sci (Chem.), Assistant at the Department of Organic and Environmental Chemistry Tyumen State University, 625003, Tyumen, 6, Volodarsky street, 625003, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2906-174X>; e-mail: [a.s.petukhov@utmn.ru](mailto:a.s.petukhov@utmn.ru)

✉ Для контактов | Corresponding author

# **ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**Научный журнал**  
**2025 Том 15 № 1 (57)**

Подписано в печать 24.03.2025. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет 26.03.2025. Цена 960 р.

Усл. печ. л. 25,88. Уч.-изд. л. 51,35. Тираж 1000 экз. Заказ 140

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова»

Адрес редакции и издателя: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»  
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8  
телефон (473) 253-72-90, факс (473) 253-76-51, e-mail: [lesteh@vglta.vrn.ru](mailto:lesteh@vglta.vrn.ru)

Участок оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»  
394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

# **FORESTRY ENGINEERING JOURNAL**

**Scientific journal**

**2025 Vol. 15 № 1 (57)**

Signed to be published 24.03.2025. Format 60×90 1/8.

Publication date 26.03.2025. Price 960 rub.

Cond. print. sh. 25,88. Acc.-print. sh. 51,35. Printing 1000 copies. Order 140

Publisher: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies  
named after G.F. Morozov» (FSBEI HE «VSUFT»)

Publisher address: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry  
and Technologies named after G.F. Morozov»

Timiryazev str., 8, Voronezh 394087

phone (473) 253-72-90, fax (473) 253-76-51, e-mail: [lesteh@vglta.vrn.ru](mailto:lesteh@vglta.vrn.ru)

Printed at the Department of Operational Printing of the FSBEI HE «VSUFT»

Dokuchaev str., 10, Voronezh 394087