

# ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал  
2023 Том 13 № 3 (51)

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

**Председатель редакционной коллегии**

д.т.н., проф. М.В. Драпалюк

**Главный редактор**

д.т.н., проф. А.И. Новиков

**Состав редакционной коллегии**

- д.с.-х.н., проф., академик РАН Н.Н. Дубенок (Россия)  
д.с.-х.н., гл.науч.сотр., академик РАН К.Н. Кулик (Россия)  
д.с.-х.н., проф., чл.-корр. РАН А.А. Мартынюк (Россия)  
д.б.н., проф., чл.-корр. РАН А.А. Сири (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. Сюнёв (Россия)  
д.б.н., проф. Н.Н. Харченко (Россия)  
д-р наук, ст. науч. сотрудник  
Клиссия Барбоза Мастранджелло (Бразилия)  
д-р наук, проф. П. Тылек (Польша)  
д-р наук С.В. Ребко (Беларусь)  
проф. Дингво 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. Седячик (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)

**Редактор**

к.ф.н. Е.А. Прыткова

**Компьютерная верстка**

к.ф.н. Е.А. Прыткова

Журнал зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных тех-  
нологий 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», 2023

# ***LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL***

Scientific Journal

**2023 Vol. 13 № 3 (51)**

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

**Editorial Board Head**

Dr., prof. M.V. Drapalyuk

**Editor-in-Chief**

Dr., prof. A.I. Novikov

**Members of editorial board**

- Dr., prof., RAS academician N.N. Dubenok (Russia)  
Dr., prof., RAS academician K.N. Kulik (Russia)  
Dr., prof. RAS corr. member 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)  
Dr., prof. K.V. Krutovsky (Russia, Germany)  
Dr., prof. S.S. Morkovina (Russia)  
Dr. J. Remes (Czech Republic)  
Dr., prof. V.A. Zelikov (Russia)  
Dr., prof. A.M. Tsybuk (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. Sedliacik (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)

**Editor**

PhD in Philology E.A. Prytkova

**Typesetting**

PhD in Philology E.A. Prytkova

The journal is registered by  
the Federal Service for Supervision  
of Communications, Information Tech-  
nology and Communications.

Registration certificate

PI № FS77-66384 of 14.07.2016

Materials of this journal may be re-  
produced only with written permission of  
the editorial board

PS FSBEI HE «VSUFT»

394087, Voronezh, Timiryazeva str., 8,

telephone (473) 253-72-90,

fax (473) 253-76-51,

e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© FSBEI HE «VSUFT», 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

**Л.В. Брындина, А.Ю. Корчагина, З. Говедар.** Биоудобрение из древесных отходов и осадка сточных вод с повышенным содержанием азота 5

**П.М. Евлаков, Робенсон Бернард Порт-Луи, Бенжамин Бернард Порт-Луи, Т.А. Гродецкая, О.А. Федорова, В.С. Рыжкова.** Влияние микроудобрений на основе водорослей на рост и развитие березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), размноженной по технологии *in vitro* 17

**Н.Н. Матвеев, Н.С. Камалова, В.И. Лисицын, Н.Ю. Евсикова, Хоай Тхьонг Нгуен.** Разность потенциалов в стволах березы повислой (*Betula pendula* Roth): особенности процессов релаксации при изменении температуры окружающей среды 30

### ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

**Румен Димитров Петрин.** Простые показатели ассиметрии, использованные при исследовании естественных одновозрастных насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Болгарии 41

**А.В. Лебедев.** Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона 56

**Т.С. Наконечная.** Оценка хозяйственной ценности плодов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в Воронежской области 71

**В.Т. Попова, А.Н. Цепляев, А.А. Попова, А.В. Пальцева, П.М. Евлаков.** Опыт выращивания посадочного материала *Thuja occidentalis* 'Smaragd' с ЗКС по технологии «Контейнер в контейнере» 87

**Ю.И. Сухоруких, С.Г. Биганова.** Критерии выделения плюсовых насаждений в защитных лесных полосах на Северо-Западном Кавказе 102

**Э.И. Трещевская, Е.Н. Тихонова, И.В. Голядкина, С.В. Трещевская, Н.И. Якимов.** Динамика естественного зарастания травянистой растительностью насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при рекультивации гидроотвала Курской магнитной аномалии 117

## CONTENTS

### NATURAL SCIENCES AND FOREST

**Bryndina L.V., Korchagina A.Y., Govedar Z.** Biofertilizer from wood waste and sewage sludge with a high nitrogen content 5

**Evlakov P.M., Robenson Bernard Port-Louis, Benjamin Bernard Port-Louis, Grodetzkaya T.A., Fedorova O.A., Ryzhkova V.S.** The effect of seaweed microfertilizers on the growth and development of *Betula pubescens* propagated using *in vitro* 17

**Matveev N.N., Kamalova N.S., Lisitsyn V.I., Evsikova N.Yu, Hoai Thuong Nguyen.** Potential difference in trunks of silver birch (*Betula pendula* Roth): features of relaxation processes at changes in ambient temperature 30

### NATURE MANAGEMENT

**Roumen D. Petrin.** Simple asymmetry indicators tested in natural even-aged Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Bulgaria 41

**Lebedev A.V.** Tree inventory in urban areas using smartphone 56

**Nakonechnaya T.S.** Assessment of the economic value of the fruits of (*Corylus avellana* L.) in the Voronezh region 71

**Popova V.T., Tseplyaev A.N., Popova A.A., Paltseva A.V., Evlakov P.M.** Experience of growing *Thuja occidentalis* 'Smaragd' planting material with a closed root system using the "Pot-in-pot" technology 87

**Sukhorukikh Y.I., Biganova S.G.** Selection Criteria for Plus Stands in Field-Protective Forest Belts in the North-Western Caucasus 102

**Treschevskaya E.I., Tikhonova E.N., Golyadkina I.V., Treschevskaya S.V., Yakimov N.I.** Dynamics of grass natural overgrowth in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands during reclamation of hydrodump of the Kursk magnetic anomaly 117

## ТЕХНОЛОГИИ.

### МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- И.Д. Евсиков, Д.С. Богданов, А.В. Попикова, А.В. Конюхов.** Влияние податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора 131
- М.А. Никулин, В.А. Иванников, С.С. Самойленков, М.К. Асмоловский.** Оценка целесообразности применения мотоблоков и мини-тракторов для механизации работ в лесных питомниках 143
- Т.П. Новикова, А.И. Новиков, Е.П. Петрищев.** Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: кластерный анализ дескрипторов 164
- В.И. Посметьев, В.О. Никонов, В.В. Посметьев, В.А. Зеликов, П.И. Попиков, П.В. Колодий, А.А. Михайлов.** Обоснование перспективной схемы кривошипного гидромотора для гидропривода опорно-поворотного устройства манипулятора лесовозного автопоезда 180
- В.В. Сиваков, А.Н. Заикин, Т.П. Новикова, В.А. Зеликов, В.В. Стасюк, А.С. Чуйков.** Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» 200

### ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА.

#### ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- А.В. Руссу, В.А. Шамаев, А. Зимелис.** Трещинообразование натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth): эффект показателя внутреннего трения под влиянием внешних возмущений 219

#### ЭКОЛОГИЯ

- Е.Н. Тихонова, Н.С. Горбунова, С.С. Шешнищан, Г.А. Одноралов.** Агроэкологическая характеристика чернозёмов Каменной степи: влияние растительных сообществ и распашки 236

## TECHNOLOGY.

### MACHINERY AND EQUIPMENT

- Evsikov I.D., Bogdanov D.S., Popikova A.V., Konyukhov A.V.** Influence of hydraulic drive compliance on dynamic loading of forest manipulator mechanisms 131
- Nikulin M.A., Ivannikov V.A., Samoylenkov S.S., Asmolovskiy M.K.** Assessing the feasibility of using tillers and mini-tractors for mechanizing work in forest nurseries 143
- Novikova T.P., Novikov A.I., Petrishchev E.P.** FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors 164
- Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V., Zelikov V.A., Popikov P.I., Kolodii P.V., Mihailov A.A.** Substantiation of a perspective scheme of a crank hydraulic motor for a hydraulic drive of a turntable of a logging truck manipulator 180
- Sivakov V.V., Zaikin A.N., Novikova T.P., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S.** Digitalization of the workflow management system of logging machines: efficiency assessment using the example of «Ponsse», «Komatsu», and «John Deere» 200

### WOOD PROCESSING.

#### CHEMICAL TECHNOLOGY

- Russu A.V., Shamaev V.A., A. Ziemelis.** Crack formation in natural and pressure-modified silver birch (*Betula pendula* Roth) wood: the effect of the internal friction index under the influence of external disturbances 291

#### ECOLOGY

- Tikhonova E.N., Gorbunova N.S., Sheshnitsan S.S., Odnorolov G.A.** Agroecological characterization of chernozems of the Kamennaya Steppe: the impact of vegetation and tillage 236



Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/1>


УДК 630.674.8



## Биоудобрение из древесных отходов и осадка сточных вод с повышенным содержанием азота

Лариса В. Брындина<sup>1</sup>✉, [bryndinv@mail.ru](mailto:bryndinv@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>

Анна Ю. Корчагина<sup>1</sup>, [nuta10011@yandex.ru](mailto:nuta10011@yandex.ru),  <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>

Зоран Говедар<sup>2</sup>, [zoran.govedar@sf.unibl.org](mailto:zoran.govedar@sf.unibl.org)  <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

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

<sup>2</sup>Государственный университет в Бая-Луке, Петра Бойовика 1А, Бая-Лука, Босния и Герцеговина

В России остро стоит вопрос переработки древесных отходов. Одним из способов вторичного использования опилок является переработка их в биоудобрения, но из-за низкого содержания азота в составе необходимо внесение дополнительных компонентов. В связи с этим рассмотрена возможность обогащения древесных опилок осадком сточных вод, который является отходом очистных сооружений. В работе методом полного факторного эксперимента проведена оптимизация состава питательной среды для повышения эффективности продуцирования ферментов биосуспензии, оценена биodeградационная возможность микроорганизмов. Биосинтез консорциума на подобранной среде достоверно увеличивал ферментативную активность: протеолитическая активность возросла в 3 раза, липолитическая – на 32,8 %, амилитическая – на 69,2 %. Оптимизация условий выращивания консорциума позволила снизить уровень загрязнения сточных вод на 84,1 %. Образующийся в ходе очистки осадок, благодаря модификации активного ила биокomпозицией подобранных микроорганизмов преобразован в продукт высокой биологической ценности: количество органического вещества увеличилось на 25,7 %, общий азот повысился в 1,7 раз, а углерод – на 5,2 %. Обогащение древесных опилок осадком сточных вод дает возможность использования смеси в качестве удобрения с высокой питательной ценностью для роста и развития растений. Внесение биокomпозита в почву позволяет повысить ее плодородие и улучшить структуру.

**Ключевые слова:** *древесные опилки, осадок сточных вод, биосинтез, органическое удобрение, биологическая суспензия*

**Финансирование:** Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 20-34-90126/№ 20 «Оптимизация биоценоза активного ила городских очистных сооружений».

**Благодарности:** Авторы выражают благодарность рецензентам и редакторам за вклад в экспертную оценку статьи.


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


**Для цитирования:** Брындина, Л. В. Биоудобрение из древесных отходов и осадка сточных вод с повышенным содержанием азота / Л. В. Брындина, А. Ю. Корчагина, З. Говедар // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 5–16. – Библиогр.: с. 12–15 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/1>.

Поступила 31.08.2023. Пересмотрена 10.11.2023. Принята 11.11.2023. Опубликована онлайн 30.11.2023.

## Article

### Biofertilizer from wood waste and sewage sludge with a high nitrogen content

Larisa V. Bryndina<sup>1</sup>✉, bryndinv@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>,

Anna Y. Korchagina<sup>1</sup>, nuta10011@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>

Zoran Govedar<sup>2</sup>, zoran.govedar@sf.unibl.org  <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

<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>State University in Banja Luka. Petra Bojovica 1A, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina

#### Abstract

In Russia, the issue of wood waste processing is acute. One of the ways to reuse sawdust is to process them into biofertilizers, but due to the low nitrogen content in the composition, additional components must be added. In this regard, the possibility of enriching sawdust with sewage sludge, which is waste from sewage treatment plants, has been considered. In the work, the composition of the nutrient medium was optimized by the method of a full factorial experiment to increase the efficiency of the production of biosuppression enzymes, the biodegradation capability of microorganisms was evaluated. The biosynthesis of the consortium on the selected medium significantly increased the enzymatic activity: proteolytic activity increased 3 times, lipolytic - by 32.8%, amylolytic – by 69.2%. Optimization of the growing conditions of the consortium allowed reducing the level of wastewater pollution by 84.1%. The sediment formed during purification, due to the modification of activated sludge by the biocomposition of selected microorganisms, was a product of high biological value: the amount of organic matter increased by 25.7%, total nitrogen increased by 1.7 times, and carbon – by 5.2%. The enrichment of sawdust with sewage sludge makes it possible to use the mixture as a fertilizer with high nutritional value for plant growth and development. The introduction of biocomposite into the soil allows to increase its fertility and improve the structure.

**Keywords:** *sawdust, sewage sludge, biosynthesis, organic fertilizer, biological suspension.*

**Funding:** this research was carried out with the support of RFBR grant 20-34-90126/No. 20 «Optimization of the biocenosis of activated sludge of urban wastewater treatment plants».

**Acknowledgments:** authors thank their gratitude to the reviewers and editors for their contribution to the expert evaluation of the article.

**Conflict of interest:** authors stated that there was no conflict of interest.

**For citation:** Bryndina L.V., Korchagina A.Y., Govedar Z. Biofertilizer from wood waste and sewage sludge with a high nitrogen content. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 5-16 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/1>.

**Received** 31.08.2023. **Revised** 10.11.2023. **Accepted** 11.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

#### Введение

Лесоперерабатывающие производства в нашей стране и зарубежом развиваются практически в одном направлении, но страны Запада очень быстро освоили комплексное использование биомассы древесины. Зарубежные предприятия рас-

сматривают древесные отходы как сопутствующее сырье, которое может быть вовлечено в производство и приносить дополнительный доход. В России сегодня перерабатывается только 48–58 % древесных отходов от 68–74 млн м<sup>3</sup>, образующихся ежегодно [1]. Причин, по которым почти половина

древесных отходов не включается во вторичное производство, много, но наиболее распространенной можно назвать отсутствие инвестиций для реализации ресурсосберегающих технологий [2]. Поэтому одним из возможных путей утилизации древесных отходов, не требующих серьезных затрат, может стать переработка их в биоудобрения, компост, почвогрунт [3]. Все эти способы не только решают вопросы рециклинга отходов, но и являются экологически безопасными. Но при таком использовании древесных отходов, из-за низкого содержания азота [4, 5], требуется внесение дополнительных компонентов. Исследования по обогащению древесных опилок различными биодобавками ведутся широко [6–9]. К наиболее распространенным способам повышения питательной ценности древесных опилок можно отнести обогащение навозом [10], осадком сточных вод [11, 12] с последующим компостированием [13–16]. Несмотря на многие положительные стороны компостирования это достаточно длительный процесс. Абузовым А.В. с соавторами в качестве биоудобрений предложено компостирование древесных отходов в течение 3–4 месяцев [17]. Для его ускорения рекомендуется вносить специфичные микроорганизмы. Беловежец Л.А. предлагает вносить в опилки микроорганизмы *Acremonium* sp., *Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes versicolor*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Sporotrichum pulverulentum*, предварительно выращенные на питательной среде определенного состава в соотношении опилок к биосуспензии 100:0,1 – 0,3 [18]. Сотрудники Тульского государственного педагогического университета для ускорения процесса разложения древесных отходов обрабатывали их грибами-деструкторами: *Pleurotus ostreatus*, *Schizophyllum commune*, *Peniophora gigantea* и компостировали [19]. Поиски новых микробных композиций, повышающих биологическую ценность биоудобрений из древесных опилок, становятся актуальными. В связи с вышеизложенным целью исследования рассмотрена возможность обогащения древесных опилок осадком сточных вод, полученным после модификации активного ила специально подобранным консорциумом микроорганизмов.

## Материалы и методы

### Предмет и объект исследований

Предметом исследования являлись характеристики разработанного состава биоудобрения из древесных отходов и осадков сточных вод, биологическая суспензия, интенсифицирующая деструкцию органических загрязнений активного ила.

Объектами исследования являлись древесные опилки сосны, ясеня, дуба; активный ил, образующийся после биологической очистки сточных вод на ООО «ЛОС» г. Воронежа.

### Сбор данных

Биологическая суспензия, интенсифицирующая деструкцию органических загрязнений активного ила представлена консорциумом микроорганизмов *Escherichia*, *Proteus*, *Staphylococcus*, *Azotobacter*, которые были идентифицированы и выделены в лаборатории промышленных биотехнологий Воронежского государственного лесотехнического университета.

Оптимизацию состава питательной среды для культивирования консорциума бактерий *Escherichia*, *Proteus*, *Staphylococcus*, *Azotobacter* проводили при температуре 37<sup>0</sup>С и начальном значении рН 7.0.

Концентрации компонентов питательной среды для культивирования консорциума микроорганизмов определяли с использованием результатов полного факторного эксперимента (ПФЭ).

Протеолитическую активность измеряли спектрофотометрическим методом по ГОСТ 20264.2-88. Определение амилолитической активности крахмалгидролизующих микроорганизмов осуществляли фотометрическим методом по ГОСТ Р 54330-2011. Липолитическую активность определяли титрованием смеси, содержащей 1см<sup>3</sup> культуральной жидкости, 2см<sup>3</sup> 1/15 М фосфатного буфера с рН 7.0 и 2.5см<sup>3</sup> эмульсии оливкового масла.

Степень очистки сточных вод определяли по химическому потреблению кислорода (ХПК, мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>) рассчитывали по формуле

$$\text{ХПК} = \frac{(a - b)N \cdot 8 \cdot 1000}{V},$$

где  $a$  – объем раствора соли Мора, пошедший на титрование контроля, см<sup>3</sup>;  $b$  – объем раствора соли Мора, использованного для титрования в экспери-

менте, см<sup>3</sup>;  $N$  – нормальность раствора соли Мора, н;  $V$  – объем проанализированных сточных вод, см<sup>3</sup>; 8 – кислородный эквивалент.

Органическое вещество определяли по ГОСТ 27980-88 термогравиметрически. Общий азот определяли по ГОСТ 26715-85. Углерод – на

элементном анализаторе «Elementar Vario Macro Cube».

В качестве факторов, влияющих на биосинтез ферментов, были выбраны  $X_1$  – картофельный крахмал,  $X_2$  – пептон. Концентрация других компонентов питательной среды, оставалась неизменной на базовом уровне. Программа исследования была заложена в матрицу и представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица планирования ПФЭ 2<sup>2</sup> и результаты эксперимента

Table 1

The planning matrix of FFE 2<sup>2</sup> and the results of the experiment

№ опыта  Experience No.	1	2	3	4
$X_1$ , картофельный крахмал, %  $X_1$ , potatostarch, %	3,1	4,1	3,1	4,1
$X_2$ , пептон, %  $X_2$ , pepton, %	0,64	0,64	1,64	1,64
Протеиназа (ПА), ед/см <sup>3</sup> $Y_{1cp}$   Proteinase (PA), ed/cm <sup>3</sup> $Y_{1sr}$	0,35	0,02	0,06	1,26
Липаза (ЛА), ед/см <sup>3</sup> $Y_{2cp}$   Lipase (LA), ed/cm <sup>3</sup> $Y_{2sr}$	167,8	233,6	250,8	301,3
Амилаза (АА), ед/см <sup>3</sup> $Y_{3cp}$   Amylase (AA), ed/cm <sup>3</sup> $Y_{3sr}$	17,2	30,9	24,9	41,5
Обозначение строк в матрице  Notation of rows in the matrix	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$

Источник: собственные экспериментальные данные  
Source: own experimental data

Для исследования эксперименты проводились по плану ПФЭ 2<sup>2</sup>, эксперимент проводился в двух повторностях в каждой точке. Однородность дисперсий оценивалась с помощью критерия Кохрена с числами степеней свободы  $v_1 = 1$ ;  $v_2 = 4$  и уровнем значимости  $q = 5\%$ .

Полученное максимальное значение критерия Кохрена для протеиназы  $G_{p1} = 0,81$ , для липазы  $G_{p2} = 0,65$ , для амилазы  $G_{p3} = 0,39$ , которые во всех случаях меньше табличных ( $G_{p1}$ ;  $G_{p2}$ ;  $G_{p3} < G_T = 0,906$ ). В силу этого процесс воспроизводим и можно предсказать ожидаемые результаты эксперимента.

Эмпирические данные подвергались статистической обработке и были получены уравнения регрессии. Коэффициенты регрессии оценивались на предмет значимости. Для биосинтеза протеиназы и липазы все коэффициенты оказались значимыми, для амилазы незначимым оказался  $b_{1,2}$ .

Предположение об адекватности полученных экспериментальных результатов было проверено с использованием критерия Фишера. Рассчитанное значение для протеиназы  $F_{r1} = 0,0008$ ; для липазы  $F_{r2} = 0,006$ ; для амилазы  $F_{r3} = 0,59$  меньше табличного ( $F_T = 7,7$ ) при числе степеней свободы  $v_1 = 1$ ;  $v_2 = 4$  и уровне значимости  $q = 5\%$ . Это свидетельствует об адекватности полученных математических представлений экспериментальным результатам. Уравнения регрессии имеют вид

$$Y_{\text{протеиназа}} = 0,42 + 0,22X_1 + 0,24X_2 + 0,38X_1 X_2,$$

$$Y_{\text{липаза}} = 238,4 + 29,1X_1 + 37,7X_2 - 3,8 X_1 X_2,$$

$$Y_{\text{амилаза}} = 28,6 + 7,6X_1 + 4,6X_2.$$

#### Анализ данных

Статистическая обработка материалов была выполнена стандартными методами вариационной статистики с применением программ Microsoft Office Excel 2010. Статистику данных осуществляли с использованием распределения Стьюдента при

уровне значимости  $q = 5\%$  и числа степеней свободы  $\nu = 4$ .

**Результаты и обсуждение**

В результате проведенных исследований для культивирования микроорганизмов была вы-

брана среда состава, г/дм<sup>3</sup>: MgSO<sub>4</sub> – 0,05; K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> – 0,2; NaCl – 0,1; картофельный крахмал – 4,0; пептон – 1,6. Биосинтез консорциума микроорганизмов на этой среде достоверно увеличивал ферментативную активность биосуспензии (рис. 1).

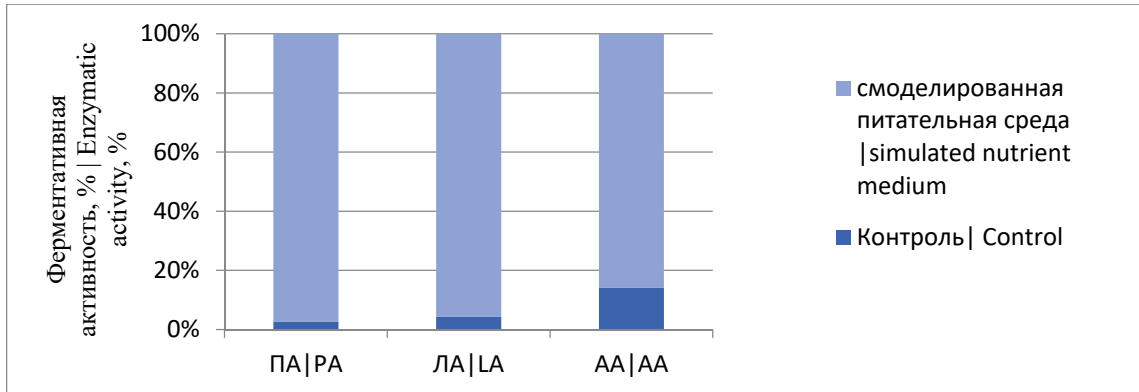


Рисунок 1. Влияние питательной среды на биосинтез ферментов  
Figure 1. The effect of the nutrient medium on the biosynthesis of enzymes

Источник: собственные экспериментальные данные  
Source: own experimental data

Протеолитическая активность возросла в 3 раза, липолитическая – на 32,8 %, амилолитическая – на 69,2 %. Но эффективность биологической очистки сточных вод, уровень ферментативной активности микроорганизмов активного ила зависит и от условий, в которых протекает очистка (количество вносимого консорциума микроорганизмов к

объему стока, температура, при которой проходила очистка, величина рН и др.) [20].

Воздействие температуры на эффективность очистки сточных вод исследовали в диапазоне 20–50 °С.

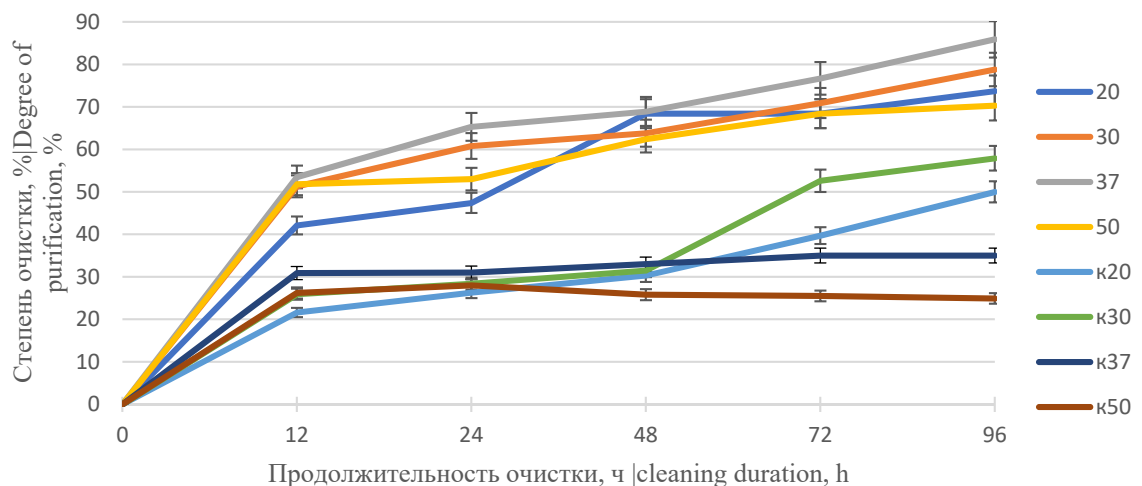


Рисунок 2. Влияние температуры на эффективность очистки сточных вод  
Figure 2. The effect of temperature on the efficiency of wastewater treatment

Источник: собственные экспериментальные данные  
Source: own experimental data

Из данных рис. 2 видно, что при всех температурах в образцах с консорциумом уже через 12 ч степень очистки вод достигала 42,1 – 53,5 %, в контрольных – всего 21,6–30,9 %. Через сутки в опытных образцах эффективность очистки при 37 °С была выше, чем при других температурах. Эта тенденция сохранялась на протяжении всего эксперимента и к 96 ч степень очистки при 37 °С была на 7,1 и 15,6 % выше, чем при температуре 30 °С и 50 °С. Возможно, это связано с тем, что ферментные системы консорциума имеют такой же температурный оптимум.

Концентрации вносимой биосуспензии на степень очистки сточных вод варьировали в интервале от 1 до 15 % к объему стока при температуре 37 °С (рис. 3). Остальные условия были такими же, как и при оценке температуры. Результаты эксперимента показали, что степень очистки стока находится в прямой зависимости от увеличения доли бактерий консорциума. Наиболее эффективно процесс очистки протекал при концентрациях 5, 10 и 15 %.

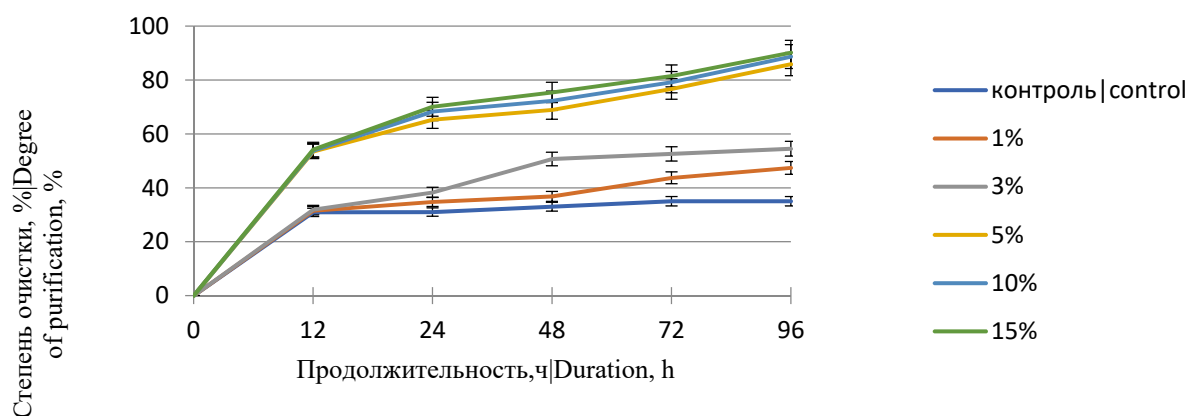


Рисунок 3. Влияние концентрации биосуспензии на эффективность очистки сточных вод

Figure 3. Effect of suspension concentration on wastewater treatment efficiency

Источник: собственные экспериментальные данные  
Source: own experimental data

Исследование биодegradационных возможностей подобранной биологической суспензии в очистке сточных вод представлено на рис. 4. Следует отметить, что уже в первые 24 ч очистка стоков с внесением консорциума была выше, чем в контроле. Эта тенденция сохранялась на протяжении всего времени очистки. Оптимизация условий выращивания консорциума позволила снизить уро-

вень загрязнения сточных вод на 84,1 % в сравнении с контролем. Образующийся в ходе очистки осадок, благодаря модификации активного ила биокomпозицией подобранных микроорганизмов представлял собой продукт высокой биологической ценности (табл. 2): количество органического вещества увеличилось на 25,7 %, общий азот повысился в 1,7 раз, а углерод – на 5,2 %.

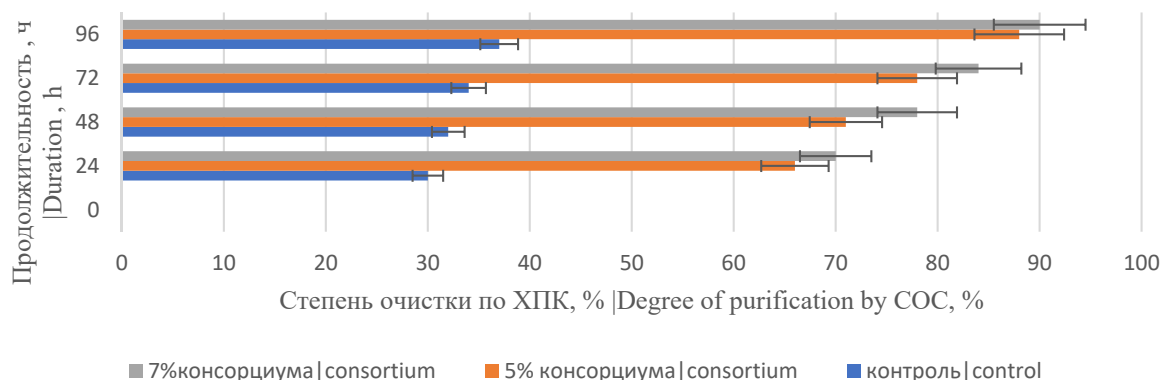


Рисунок 4. Динамика изменения ХПК  
Figure 4. Dynamics of COD changes

Источник: собственные экспериментальные данные  
Source: own experimental data

Таблица 2

Элементарный состав осадков сточных вод

Table 2

Elementary composition of sewage sludge

Показатели   Indicators	Осадок сточных вод sewage sludge	Осадок сточных вод при использовании биологической суспензии   sewage sludge when using biological suspension
Органическое вещество,%   Organic matter,%	57,3	83,02
Общий азот, %   Total nitrogen, %	2,69	4,5
Углерод, %   Carbon, %	76,6	81,8

Источник: собственные экспериментальные данные  
Source: own experimental data

Исходя из высокой питательной ценности опилок и осадка по органическому веществу были проведены исследования по их применению в качестве удобрения для роста и развития растений.

Эффективность действия органического удобрения определяется его влиянием на гумусообразование. Исследование последствий древесных опилок и ОСВ на гумусообразование представлено в табл. 3.

Таблица 3

Накопление органического вещества в почве (0-20см), %|

Table 3

Accumulation of organic matter in the soil (0-20 cm), %

Опыт   Experience	Продолжительность, месяц (среднее ± СКО)   Duration, month (Avg ± SD)				
	1	3	6	9	12
Контроль control	4,43±0,04	4,39±0,02	3,87±0,03	3,80±0,02	3,78±0,04
20 % ОСВ   sewage sludge	6,32±0,02	6,67±0,01	6,70±0,03	6,71±0,01	6,70±0,01
20 % опилки   sawdust	4,42±0,05	4,54±0,03	3,68±0,01	3,68±0,03	3,65±0,05

Опыт   Experience	Продолжительность, месяц (среднее ± СКО)   Duration, month (Avg ± SD)				
	1	3	6	9	12
5 % ОСВ   sewage sludge + 15 % опилки   sawdust	6,16±0,03	6,32±0,03	6,38±0,05	6,40±0,05	6,40±0,05
15 % ОСВ   sewage sludge + 5 % опилки   sawdust	6,35±0,05	6,51±0,01	6,62±0,03	6,65±0,02	6,65±0,04
10 % ОСВ   sewage sludge + 10 % опилки   sawdust	6,32±0,05	6,60±0,03	6,65±0,01	6,65±0,02	6,65±0,04

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

Почвенные микроорганизмы контролируют процесс изменения органических веществ. Внесение древесных опилок, обогащенных ОСВ, повышает ферментативную активность почвы за счет увеличения количественного и качественного изменения состава микрофлоры. Во всех опытах, где в удобрении присутствует ОСВ, к 6 месяцам эксперимента отмечено активное накопление органического вещества и его дальнейшая стабилизация. В контрольном варианте и опыте с опилками наблюдается снижение гумусообразования к этому времени.

Видимо микроорганизмы ОСВ не только активизируют работу почвенных бактерий, но и ста-

билизируют формирование органической составляющей биокomпозиции.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что биологическая суспензия, в состав которой входит смесь живых клеток бактерий *Escherichia*, *Proteus*, *Staphylococcus*, *Azotobacter*, благодаря высокой способности к биодеструкции органических загрязнений, обогащает биокomпозит питательными веществами.

Полученный биокomпозит из древесных опилок и ОСВ обладает комплексом благоприятных для почвенных микроорганизмов и растений свойств, что позволяет улучшать структуру почвы и повышать ее плодородие.

### Список литературы

- Графова Е. О., Сюнёв В. С., Горбач В. В. Анализ факторов негативного воздействия лесозаготовительного производства на природную среду Северо-Западного региона. Лесотехнический журнал. 2023; 2 (50): 5–24. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/1>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54525077>.
- Антонов Г. И., Сорокин Н. Д., Барченков А. П., Кондакова О. Э. Оптимизация лесовыращивания с использованием биоконверсии древесно-опилочной массы в условиях Красноярской лесостепи. Лесоведение. 2018; 1: 56–64. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0024114818010059> – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32319244>.
- Семенов В. М., Паутова Н. Б., Лебедева Т. Н., Хромычкина Д. П., Семенова Н. А., Лопес де Гереню В. О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов. Почвоведение. 2019; 10: 1172–1184. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113> – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39324165>.
- Миронов П. В., Алаудинова Е. В., Эназаров Р. Х., Саволайнен А. С. Микробиологическая конверсия отходов деревообработки с получением органических удобрений. Хвойные бореальной зоны. 2018; 36(3): 275–278. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36643087>.
- Боровков А. В. Перспективы применения вторичных древесных ресурсов для повышения почвенного плодородия лесных питомников и выращивания сеянцев хвойных пород в Казахстане. Лесозаготовительное производство: проблемы и решения. 2021; 35–40. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47694897>.



6. Liu C., Yan J., Huang Q. *et al.* The addition of sawdust reduced the emission of nitrous oxide in pig manure composting by altering the bacterial community structure and functions. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022; 29: 3733–3742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15786-2>.
7. Guo H., Gu J., Wang X., Yu J., Nasir M., Zhang K., Sun W. Microbial driven reduction of N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> emissions during composting: effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar. *J Hazard Mater.* 2020; 390: 121292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121292>.
8. Zhan Y., Wei Y., Zhang Z. *et al.* Effects of different C/N ratios on the maturity and microbial quantity of composting with sesame meal and rice straw biochar. *Biochar*, 2021; 3: 557–564 DOI: <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00110-5>.
9. Kebibeche H., Khelil O., Kacem M., Kaid Harche M. Addition of wood sawdust during the co-composting of sewage sludge and wheat straw influences seeds germination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019; 168: 423–430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.075>.
10. Семенов М. В., Железова А. Д., Ксенофонтова Н. А., Иванова Е. А., Никитин Д. А. Куриный помет как органическое удобрение: технологии компостирования и влияние на почвенные свойства (обзор). *Бюллетень почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2023; 115: 160–198. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-160-198>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54264716>.
11. Белаш М. Ю., Веприкова Е. В., Соболев А. А., Романов В. Н. Получение, свойства и ростостимулирующая активность гранулированных азотсодержащих органоминеральных удобрений на основе опилок осины. *Химия растительного сырья*. 2022; 4: 353–361. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220411955>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50003021>.
12. Кравцова М. В., Чариков Ю. В., Волков Д. А., Мельникова Д. А., Постовитова Т. А., Кравцов М. В. Исследование осадков сточных вод для получения органоминерального удобрения. *Экология и промышленность России*. 2023; 27(4): 17–21. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-17-21>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50494369>.
13. Yu J., Gu J., Wang X., Guo H., Wang J., Lei L., Dai X., Zhao W. Effects of inoculation with lignocellulose-degrading microorganisms on nitrogen conversion and denitrifying bacterial community during aerobic composting. *Bioresour Technol.* 2020; 313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123664>.
14. Conthe M., Lycus P., Arntzen M.Ø., Ramos da Silva A., Frostegård Å., Bakken L.R., Kleerebezem R., van Loosdrecht M.C.M. Denitrification as an N<sub>2</sub>O sink. *Water Res.* 2019; 151: 381–387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.087>.
15. Phanwilai S., Kangwannarakul N., Noophan P. *et al.* Nitrogen removal efficiencies and microbial communities in full-scale IFAS and MBBR municipal wastewater treatment plants at high COD:N ratio. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2020; 115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11783-020-1374-2>.
16. Guo J., Cong Q., Zhang L., Meng L., Ma F., Zhang J. Exploring the linkage between bacterial community composition and nitrous oxide emission under varied DO levels through the alternation of aeration rates in a lab-scale anoxic-oxic reactor. *Bioresour Technol.* 2019; 291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121809>.
17. Абузов А. В., Дахова Е. В., Шевчук А. С. Возможность использования отходов лесной промышленности для создания биоудобрений. *Инженерный вестник Дона*, 2023: 272–282. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54724897>.
18. Патент № 2 701 942 Российская Федерация, МПК C05F 11/08(2006.01). Способ утилизации древесных опилок с применением композиции дереворазрушающих микроорганизмов для получения комплексного органоминерального удобрения. 2019103074: заявл. 05.02.2019: опубл. 02.10.2019// Беловежец Л.А. – 8 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41276405>.
19. Мягкова А. С., Третьякова А. В., Песцов Г. В. Утилизация древесины с помощью грибов-биодеструкторов. *Матер. науч. конференции научно-педагогических работников, аспирантов, магистрантов ТГПУ им. Л.Н. Толстого. Тула*, 2021: 182–185. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47776798>.

20. Пашкевич М. А., Коротаева А. Э. Анализ биологических методов для очистки карьерных сточных вод от азотных соединений. Геология и геофизика юга России. 2021; 11(4): 170–182. DOI: <https://doi.org/10.46698/VNC.2021.87.18.014>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47558335>

### References

1. Grafova E. O., Syunev V. S., Gorbach V. V. Analiz faktorov negativnogo vozdeistviya lesozagotovitel'nogo proizvodstva na prirodnyuyu sredu Severo-Zapadnogo regiona. [Analysis of factors of the negative impact of logging production on the natural environment of the North-Western region]. Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry magazine. 2023; 2 (50): 5–24. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/1>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54525077>.

2. Antonov G. I., Sorokin N. D., Barchenkov A. P., Kondakova O. E. Optimizatsiya lesovyrashchivaniya s ispol'zovaniem biokonversii drevesno-opilochnoj massy v usloviyah Krasnoyarskoj lesostepi. [Optimization of forest cultivation using bioconversion of sawdust in the conditions of the Krasnoyarsk forest-steppe]. Lesovedenie = Forest Science. 2018; 1: 56–64. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0024114818010059>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32319244>.

3. Semenov V. M., Pautova N. B., Lebedeva T. N., Hromychkina D. P., Semenova N. A., Lopes de Gerenyu V. O. Razlozhenie rastitel'nyh ostatkov i formirovanie aktivnogo organicheskogo veshchestva v pochve inkubacionnykh eksperimentov. [Decomposition of plant residues and formation of active organic matter in the soil of incubation experiments]. Pochvovedenie = Soil science. 2019; 10: 1172–1184. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39324165>.

4. Mironov P. V., Alaudinova E. V., Enazarov R. H., Savolajnen A. S. Mikrobiologicheskaya konversiya othodov derevoobrabotki s polucheniem organicheskikh udobrenij. [Microbiological conversion of woodworking waste to produce organic fertilizers.]. Hvojnye boreal'noj zony = Conifers of the boreal zone. 2018; 36(3): 275–278. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36643087>.

5. Borovkov A. V. Perspektivy primeneniya vtorichnyh drevesnyh resursov dlya povysheniya pochvennogo plodorodiya lesnykh pitomnikov i vyrashchivaniya seyancev hvojnykh porod v Kazahstane. [Prospects for the use of secondary wood resources to increase the soil fertility of forest nurseries and the cultivation of coniferous seedlings in Kazakhstan]. Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya = Logging production: problems and solutions. 2021: 35–40. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47694897>.

6. Liu C., Yan J., Huang Q. et al. The addition of sawdust reduced the emission of nitrous oxide in pig manure composting by altering the bacterial community structure and functions. EnvironSciPollut Res. 2022; 29: 3733–3742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15786-2>.

7. Guo H., Gu J., Wang X., Yu J., Nasir M., Zhang K., Sun W. Microbial driven reduction of N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> emissions during composting: effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar. J Hazard Mater. 2020; 390: 121292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121292>.

8. Zhan Y., Wei Y., Zhang Z. et al. Effects of different C/N ratios on the maturity and microbial quantity of composting with sesame meal and rice straw biochar. Biochar, 2021; 3: 557–564 DOI: <https://doi.org/10.1007/s42773-021-00110-5>.

9. Kebibeche H., Khelil O., Kacem M., Kaid Harche M. Addition of wood sawdust during the co-composting of sewage sludge and wheat straw influences seeds germination. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019; 168: 423–430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.10.075>.

10. Semenov M. V., ZHelezova A. D., Ksenofontova N. A., Ivanova E. A., Nikitin D. A. Kurinyj pomet kak organicheskoe udobrenie: tekhnologii kompostirovaniya i vliyanie na pochvennye svoystva (obzor). [Chicken manure as organic fertilizer: composting technologies and impact on soil properties (review)]. Byulleten' pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva = Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute. 2023; 115: 160–198. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-160-198>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54264716>.

11. Belash M. Yu., Veprikova E. V., Sobolev A. A., Romanov V. N. Poluchenie, svoystva i rostostimuliruyushchaya aktivnost' granulirovannykh azotsoderzhashchih organo-mineral'nykh udobrenij na osnove opilok osiny. [Preparation, properties and growth-stimulating activity of granular nitrogen-containing organo-mineral fertilizers based on aspen sawdust]. *Himiya rastitel'nogo syr'ya* = Chemistry of plant raw materials. 2022; 4: 353–361. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220411955>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50003021>.
12. Kravcova M. V., CHarikov YU. V., Volkov D. A., Mel'nikova D. A., Postovitova T. A., Kravcov M. V. Issledovanie osadkov stochnykh vod dlya polucheniya organomineral'nogo udobreniya. [Study of sewage sludge to obtain organomineral fertilizer]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = Ecology and industry of Russia. 2023; 27(4): 17–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-17-21>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50494369>.
13. Yu J., Gu J., Wang X., Guo H., Wang J., Lei L., Dai X., Zhao W. Effects of inoculation with lignocellulose-degrading microorganisms on nitrogen conversion and denitrifying bacterial community during aerobic composting. *Bioresour Technol.* 2020; 313:123664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123664>.
14. Conthe M., Lycus P., Arntzen M.Ø., Ramos da Silva A., Frostegård Å., Bakken L. R., Kleerebezem R., van Loosdrecht M.C.M. Denitrification as an N<sub>2</sub>O sink. *Water Res.* 2019; 151: 381–387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.087>.
15. Phanwilai S., Kangwannarakul N., Noophan P. et al. Nitrogen removal efficiencies and microbial communities in full-scale IFAS and MBBR municipal wastewater treatment plants at high COD:N ratio. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2020; 115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11783-020-1374-2>
16. Guo J., Cong Q., Zhang L., Meng L., Ma F., Zhang J. Exploring the linkage between bacterial community composition and nitrous oxide emission under varied DO levels through the alternation of aeration rates in a lab-scale anoxic-oxic reactor. *Bioresour Technol.* 2019; 291: 121809. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121809>.
17. Abuzov A. V., Dahova E. V., Shevchuk A. S. Vozmozhnost' ispol'zovaniya othodov lesnoj promyshlennosti dlya sozdaniya bioudobrenij. [The use of waste from the forest industry to create biofertilizers]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2023; 272–282. (In Russ.). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54724897>.
18. Patent № 2 701 942 Rossijskaya Federaciya, MPK C05F 11/08(2006.01). Sposob utilizacii drevesnykh opilok s primeneniem kompozicii derevorazrushayushchih mikroorganizmov dlya polucheniya kompleksnogo organomineral'nogo udobreniya. [A method for the disposal of sawdust using a composition of wood-destroying microorganisms to obtain a complex organomineral fertilizer.]. 2019103074: zayavl. 05.02.2019: opubl. 02.10.2019// *Belovezhec L.A.* – 8s. (In Russ.). – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41276405>.
19. Myagkova A. S., Tret'yakova A. V., Pestsov G. V. Utilizatsiya drevesiny s pomoshch'yu gribov-biodestruktorov. [Wood recycling using biodestructor mushrooms]. *Materialy nauchnoi konferentsii nauchno-pedagogicheskikh rabotnikov, aspirantov, magistrantov TGPU im. L.N. Tolstogo. Tula*, 2021: 182–185. (In Russ.). – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47776798>.
20. Pashkevich M. A., Korotaeva A. E. Analiz biologicheskikh metodov dlya ochistki kar'ernykh stochnykh vod ot azotnykh soedinenij. [Analysis of biological methods for the treatment of quarry wastewater from nitrogen compounds]. *Geologiya i geofizika yuga Rossii* = Geology and Geophysics of the South of Russia. 2021; 11(4): 170–182. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.46698/VNC.2021.87.18.014>. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47558335>.

### Сведения об авторах

✉ *Брындина Лариса Васильевна* – доктор с.-х. наук, главный научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий НИИ ИТЛК, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: [bryndinv@mail.ru](mailto:bryndinv@mail.ru).

*Корчагина Анна Юрьевна* – младший научный сотрудник лаборатории промышленных биотехнологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: [korchaginav@mail.ru](mailto:korchaginav@mail.ru).

зева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-2168-1211>, e-mail: [nuta10011@yandex.ru](mailto:nuta10011@yandex.ru).

*Zoran Govedar* – профессор Факультета лесного хозяйства Университета Банья Лука, доктор наук, Банья Лука, Босния и Герцеговина, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>, e-mail: [zoran.govedar@sf.unibl.org](mailto:zoran.govedar@sf.unibl.org).

### Information about the authors

✉ *Bryndina Larisa Vasilievna* – Dr. Sci. (Agric.), Chief Researcher of the Laboratory of Industrial Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-2345-6789>, e-mail: [bryndinv@mail.ru](mailto:bryndinv@mail.ru).

*Korchagina Anna Yuryevna* – Junior Researcher at the Laboratory of Industrial Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2168-1211>, e-mail: [nuta10011@yandex.ru](mailto:nuta10011@yandex.ru).

*Zoran Govedar* – Doctor of Forestry Sciences, Full professor, Correspondence member of Academy of Science and Arts of the Republic of Srpska, Department of Silviculture, Faculty of Forestry Banja Luka, Academy of Science and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka, Republic of Srpska/Bosnia and Herzegovina, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>, e-mail: [zoran.govedar@sf.unibl.org](mailto:zoran.govedar@sf.unibl.org).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/2>

УДК 631.532/.535:581.14



## Влияние микроудобрений на основе водорослей на рост и развитие березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), размноженной по технологии *in vitro*

Петр М. Евлаков<sup>1</sup>✉, [peter.evlakov@yandex.ru](mailto:peter.evlakov@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-0138-2410>

Робенсон Бернард Порт-Луи<sup>2</sup>, [seaweedseychelles@gmail.com](mailto:seaweedseychelles@gmail.com)

Бенжамин Бернард Порт-Луи<sup>3</sup>, [ceo@yes-seychelles.com](mailto:ceo@yes-seychelles.com)

Татьяна А. Гродецкая<sup>1</sup>✉, [tatyana.pokusina@yandex.ru](mailto:tatyana.pokusina@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5448-2792>

Ольга А. Федорова<sup>1</sup>, [fed-olga78@mail.ru](mailto:fed-olga78@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7581-6141>

Владлена С. Рыжкова<sup>1</sup>, [vladlena.r11@yandex.ru](mailto:vladlena.r11@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0000-9727-3088>

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

<sup>2</sup>ООО «Морские водоросли Сейшельских островов»

<sup>3</sup>НКО «Развитие возможностей для молодежи на Сейшельских островах»

В последние десятилетия все большую популярность в мире приобретает органическое земледелие, в котором не используются искусственные химические удобрения и пестициды. С давних пор морские водоросли использовались в качестве стимулятора роста растений для получения высококачественной экологически чистой продукции. В то же время, их влияние на древесные культуры еще недостаточно изучено. В статье рассматривается влияние микроудобрений Seaweed Seychelles Liquid<sup>1®</sup>™ на основе водорослей с Сейшельских островов на рост и развитие березы пушистой 15-1 (*Betula pubescens* Ehrh.), размноженной способом *in vitro*. В качестве объекта исследования использовали экспланты на стадии мультипликации и растения, переведенные для доращивания в условия закрытой корневой системы (ЗКС). В среду woody plant medium (WPM) для культивирования древесных растений, дополненную регуляторами роста 300 мкг/л бензиламино-пурина (БАП) и 200 мкг/л индоллил-3-уксусной кислоты (ИУК) для подкормки вносили микроудобрения в концентрации 10, 15, 20, 25 % об. Рекомендованную производителем концентрацию 20% об. использовали при переводе в нестерильные условия. Растения культивировали в контролируемых условиях *in vitro* лаборатории и теплицы в течение двух недель и двух месяцев, соответственно, после чего фиксировали изменение морфометрических параметров. Полученные результаты свидетельствуют о стимулирующем воздействии органического удобрения при использовании концентраций 20 и 25 % об. на микроклоны березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) в условиях *in vitro*. Более значительная стимуляция наблюдалась в условиях ЗКС, где прирост опытных растений был выше контрольных на 22% по окончании опыта. Результаты проведенных экспериментов позволяют рекомендовать органические удобрения из морских водорослей для стимуляции ростовых процессов у березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) при использовании концентраций не менее 20% об. при культивировании в условиях ЗКС.

**Ключевые слова:** морские водоросли, органические удобрения, древесные растения, береза пушистая, *Betula pubescens*, *in vitro*, клональное микроразмножение, закрытая корневая система, ростовые процессы

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000020-6-4.1.2 «Отбор хозяйственно ценных и устойчивых к изменению климата древесных культур, отличающихся высокой биологической

продуктивностью и потенциалом секвестрации углерода с учетом региональных почвенно-климатическим особенностей для реализации лесоклиматических проектов (FZUR-2023-0002)».

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

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

**Для цитирования:** Влияние микроудобрений на основе водорослей на рост и развитие березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.), размноженной по технологии *in vitro* / П. М. Евлаков, Робенсон Бенард Порт-Луи, Бенжамин Бенард Порт-Луи, Т. А. Гродецкая, О. А. Федорова, В. С. Рыжкова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 17–29. – Библиогр.: с. 25–28 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/2>.

**Поступила:** 02.11.2023. **Пересмотрена** 20.11.2023. **Принята:** 20.11.2023. **Опубликована онлайн:** 30.11.2023


### Article


## Study of the effect of Seychelles seaweed fertilizers on the parameters of growth and development of *Betula pubescens* propagated *in vitro*


Peter M. Evlakov<sup>1</sup>✉, peter.evlakov@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-0138-2410>

Robenson Bernard Port-Louis<sup>2</sup>, seaweedseychelles@gmail.com

Benjamin Bernard Port-Louis<sup>3</sup>, ceo@yes-seychelles.com

Tatiana A. Grodetzkaya<sup>1</sup>✉, tatyana.pokusina@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5448-2792>

Olga A. Fedorova<sup>1</sup>, fed-olga78@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7581-6141>

Vladlena S. Ryzhkova<sup>1</sup>, vladlena.r11@yandex.ru,  <https://orcid.org/0009-0000-9727-3088>

<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> Seychelles Seaweed LLC

<sup>3</sup> Youth non-profit organization “Youth Empowerment Seychelles”

### Abstract

In recent decades, organic farming, which does not use artificial chemical fertilizers and pesticides, has become increasingly popular in the world. Since ancient times, seaweed has been used as a plant growth stimulant to produce high-quality environmentally friendly products. At the same time, their influence on tree crops has not yet been sufficiently studied. The article examines the effect of Seaweed Seychelles Liquid<sup>®</sup>™ microfertilizers based on algae from the Seychelles on the growth and development of downy birch 15-1, propagated *in vitro*. The objects of study were explants at the multiplication stage and plants transferred into pots for growing in greenhouse conditions. Microfertilizers at a concentration of 10, 15, 20, 25 % vol. were added to the woody plant medium (WPM) for the cultivation of woody plants, supplemented with growth regulators 300 µg/l benzylamino-purine (BAP) and 200 µg/l indolyl-3-acetic acid (IAA). The manufacturer's recommended concentration 20% vol. was used when transferring to non-sterile conditions. Plants were cultivated under controlled conditions in *in vitro* laboratory and greenhouse for two weeks and two months, respectively, after which changes in morphometric parameters were recorded. The results obtained indicate the stimulating effect of organic fertilizer when using concentrations of 20 and 25% vol. on birch microclones *in vitro*. More significant stimulation was observed for potted plants, where the growth of experimental objects was 22% higher than control plants at the end of the experiment. The results of the experiments allow us to recommend organic fertiliz-

ers from seaweed to stimulate growth processes in woody plants when using concentrations of at least 20% vol. when cultivated in pots.

**Keywords:** seaweed, organic fertilizers, woody plants, *Betula pubescens*, in vitro, clonal micropropagation, potted plants, growth processes

**Funding:** The study was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 1023013000020-6-4.1.2 "Selection of economically valuable and resistant to climate change forest crops, characterized by high biological productivity and carbon sequestration potential, taking into account regional soil and climatic characteristics for the implementation of forest climate projects (FZUR-2023-0002)")

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

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

**For citation:** Evlakov P. M., Robenson Bernard Port-Louis, Benjamin Bernard Port-Louis, Grodetskaya T. A., Fedorova O. A., Ryzhkova V. S. (2023). The effect of seaweed microfertilizers on the growth and development of *Betula pubescens* propagated using in vitro. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 17-29 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/2>.

**Received:** 02.11.2023. **Revised:** 20.11.2023. **Accepted:** 20.11.2023. **Published online:** 30.11.2023.

### Введение

В последние десятилетия использование морских водорослей для переработки и использовании в различных отраслях производства набирает стремительные обороты. Морские водоросли являются сырьем для производства биотоплива, косметики, фармацевтических препаратов, биопластиков и др. Одним из возможных вариантов использования водорослей является получение наночастиц методом «зеленого синтеза» [1]. Кроме того, они вносят значительный вклад в снижение парникового эффекта. В год морскими водорослями в среднем поглощается до 173 мегатонн углекислого газа [2].

Во многих промышленных странах синтетические удобрения в настоящее время замещаются органическими, которые не только не наносят вред растениям и человеку, но также существенно улучшают структуру почвы, изменяя ее механический состав и повышая образование почвенных гидроколлоидов [5], поддерживают состояние почвенной микрофлоры и стимулируют рост растений [3,4].

Морские водоросли могут использоваться в сыром виде при закладывании их в почву, в виде компоста, золы или вытяжек при корневой и внекорневой подкормке. Биологически-активные вещества, обнаруженные в составе морских водорослей, могут оказывать положительное действие на иммунитет растений в условиях стресса. В экстрактах морских водорослей были обнаружены различные фитогормоны и регуляторы роста, включая ауксины, цитокинины, этилен, гиббереллины, абсцизовую кислоту, влияющие на морфогенез растений [6, 7, 8]. Во многих работах показано положительное воздействие морских водорослей на формирование целых растений из каллуса, улучшение их морфо-анатомических и физиолого-биохимических характеристик. Использование коммерческого препарата морских водорослей способствовало стимуляции укоренения и роста побегов у *Lantana camara* и *Abelia × grandiflora* [9]. Применение удобрений на основе саргасовых водорослей в концентрации 20 % с частотой одного раза в неделю способствовало увеличению высоты, биомассы, количества листьев, сухого веса и количества

цветков у розы [10]. Повышение поглощения углекислого газа при использовании водорослей было установлено при культивировании риса [11]. Отмечена регуляция генов цветения у томата при культивировании с использованием саргасовых водорослей [12].

Высокое содержание микроэлементов и фитогормонов делают удобрения на основе водорослей перспективными для использования в технологии культивирования *in vitro*. Применение экстрактов морских водорослей *Fucus spiralis* и *Cystoseira myriophylloides* в концентрации 25% в среде MS способствовало увеличению эффективности регенерации у табака, в то время как увеличение концентрации удобрений вызывало токсический эффект [13].

Немаловажной является также роль удобрений на основе морских водорослей для борьбы со стрессом у растений [14, 15]. Их экстракты снижают активность патогенной микрофлоры и запускают защитные механизмы у растений [16]. При воздействии абиотического стресса применение микроводорослей стимулируется поглощение нутриентов и ростовые процессы [17]. Применение биостимуляторов из *Ascophyllum nodosum* способствовало восстановлению сои после осмотического стресса [18].

В России применение органических удобрений на основе морских водорослей считается новым направлением в сельском и лесном хозяйстве. Перспектива получения удобрений с улучшенными свойствами и более низкой стоимостью диктует необходимость интенсификации исследований в данной области.

В статье рассматривается влияние микроудобрений на основе водорослей с Сейшельских островов на рост и развитие березы пушистой 15-1, размноженной способом *in vitro*. Seaweed Seychelles Liquid<sup>®</sup>™ - это натуральный стимулятор роста растений, который

не содержит химических веществ. Он используется в виде спрея для получения здоровых растений, улучшения их роста, урожайности, скорости плодоношения, повышения сопротивляемости инфекциям и вредителям. Этот продукт может быть полезен для тех, кто хочет вырастить здоровые растения без использования химических пестицидов и инсектицидов.

### Материалы и методы

Объектом исследований являлись растения березы пушистой 15-1 (*Betula pubescens* Ehrh.), отобранные по 5 генам устойчивости к засухе и хранящиеся в коллекции *in vitro* Воронежского государственного лесотехнического университета. В опыте были использованы клонально размноженные растения на стадии мультипликации и дорастивания в условиях теплицы. Для подкормки и стимуляции ростовых процессов березы использовали удобрения Seaweed Seychelles Liquid<sup>®</sup>™ (Seaweed Seychelles Pty Ltd, Сейшельские острова). Микроэлементный состав удобрений представлен в табл. 1. Оценку влияния микроудобрения на ростовые процессы в культуре *in vitro* проводили на микропобегах березы на среде для древесных культур WPM. Среда готовилась по стандартной методике [19], перед стерилизацией в готовую среду вносили регуляторы роста 300 мкг/л бензиламинопурин (БАП) и 200 мкг/л индолил-3-уксусную кислоту (ИУК), а также раствор микроудобрений в концентрациях 10, 15, 20, 25 % об. В качестве контроля использовали среду без добавления микроудобрений. Для каждой испытуемой концентрации брали по 30 микропобегов (по 10 растений, повторность 3-кратная), которые по одному помещали в стерильные пробирки с готовой питательной средой. Перед началом эксперимента измеряли высоту микропобегов. Пробирки с эксплантами помещали на стеллажи с досвечиванием. Условия климатического режима: 16-ти часовой фотопериод при освеще-



шенности 2-3 клк, температуре 24-26°C. По истечении 2 недель оценивали жизнеспособность микропобегов, а также их высоту. По разнице с первоначальными данными по высоте, вычисляли прибавку в росте.

В эксперименте по доращиванию березы пушистой в условиях теплицы участвовали 20 растений с закрытой корневой системой (ЗКС), высаженных в контейнеры П 9 объемом 500 см<sup>3</sup>. При этом, опытные растения удобряли путём внекорневой подкормки органическим удобрением одновременно с поливом. Изучали воздействие микроудобрений в концентрации, рекомендованной производителем (20 %). Внекорневая подкормка производилась путём опрыскивания из пульверизатора 1 раз в неделю (рис. 1).

Для исключения негативного влияния препарата микроудобрений на представителей полезной почвенной микрофлоры (PGPR, Plant Growth Promoting Rhizobacteria) изучали влияние биопрепарата на свободноживущие азотфиксаторы и diaзотрофы (*Azotobacter chroococcum*, *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp.,

*Agrobacterium* sp.), стимуляторы роста растений Plant Growth Promoting Rhizobacteria (*Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*), актиномицеты. Изучаемые культуры были выделены из ризосферы культурных растений и хранятся в коллекции микроорганизмов лаборатории анализа ПЦР ВГЛТУ.

Определение влияния биопрепарата на представителей полезной почвенной микрофлоры оценивали методом колодцев, описанным в руководстве [20]. Для этого поверхность селективной питательной среды в чашках Петри засеивали соответствующей культурой микроорганизма. В центре чашки из агара вырезали колодцы (d = 6 мм), в которые вносили по 100 мкл испытуемого препарата. Чашки с посевами ставили в термостат при 280 °C на 4-5 суток. Степень ингибирования роста культур микроорганизмов оценивали по диаметру зоны с отсутствием роста вокруг колодцев.

Статистическую обработку проводили с использованием программы Statistica версии 12.6 («StatSoft, Inc.», США).

Таблица 1

НРК-анализ концентрированного экстракта морских водорослей

Table 1

NPK Analysis of Concentrated Seaweed Extract

Параметр   Parameters	Статистика   Stat	
	Среднее значение   Mean	% по массе   % by mass
Азот, мг/л   Nitrogen, mg/L	155 ± 2	4
Фосфор, мг/л   Phosphorus, mg/L	2739 ± 164	66
Калий, мг/л   Potassium, mg/L	1268 ± 49	30

Примечание: Данные в таблице представляют собой анализ содержания N, P и K в одном контейнере за 20 дней. Среднее значение 5 образцов, за которым следует ± стандартное отклонение, представленное в столбце статистики. Процент по массе представляет собой массовую долю от общего количества основного содержания питательных веществ (НРК).

Note: The data presented are N,P and K content analysed from single container over a 20 days period. The mean of 5 samples follow by ± Standard Deviation is presented under stat column. The percentage by mass is the mass proportion of the total major nutrient content (NPK).

Источник: <https://www.seaweedseychelles.com/research-and-development> [дата обращения 21.09.23].

Source: <https://www.seaweedseychelles.com/research-and-development> [date accessed 09/21/23]



Рисунок 1. Обработка растений березы препаратом морских водорослей путем опрыскивания

Figure 1. Treatment of birch plants with a seawater preparation by spraying

Источник: собственная композиция автор(ов)

Source: author's composition

### Результаты и обсуждение

В технологии *in vitro* микроудобрения из водорослей используются для выращивания растений в контролируемых условиях. Они обеспечивают растения необходимыми питательными веществами и могут стимулировать их рост и развитие. Микроудобрения содержат микро- и макроэлементы элементы, такие как азот, фосфор, калий, магний, кальций, железо, марганец, медь, цинк, молибден и другие. Они способствуют улучшению качества и количе-

ства урожая, улучшают иммунитет растений и помогают им адаптироваться к различным условиям окружающей среды.

Влияние различных концентраций микроорганических удобрений на рост эксплантов березы исследовали в течение двух недель в условиях *in vitro*.

По окончании эксперимента были измерены морфометрические показатели у экспериментальных и контрольных растений (рис. 2, 3).



Рисунок 2. Внешний вид эксплантов березы на момент окончания эксперимента. К – контрольные образцы,

О – опытные образцы

Figure 2. Appearance of birch explants at the end of the experiment. К – control samples, О – experimental samples

Источник: собственная композиция автор(ов)

Source: author's composition

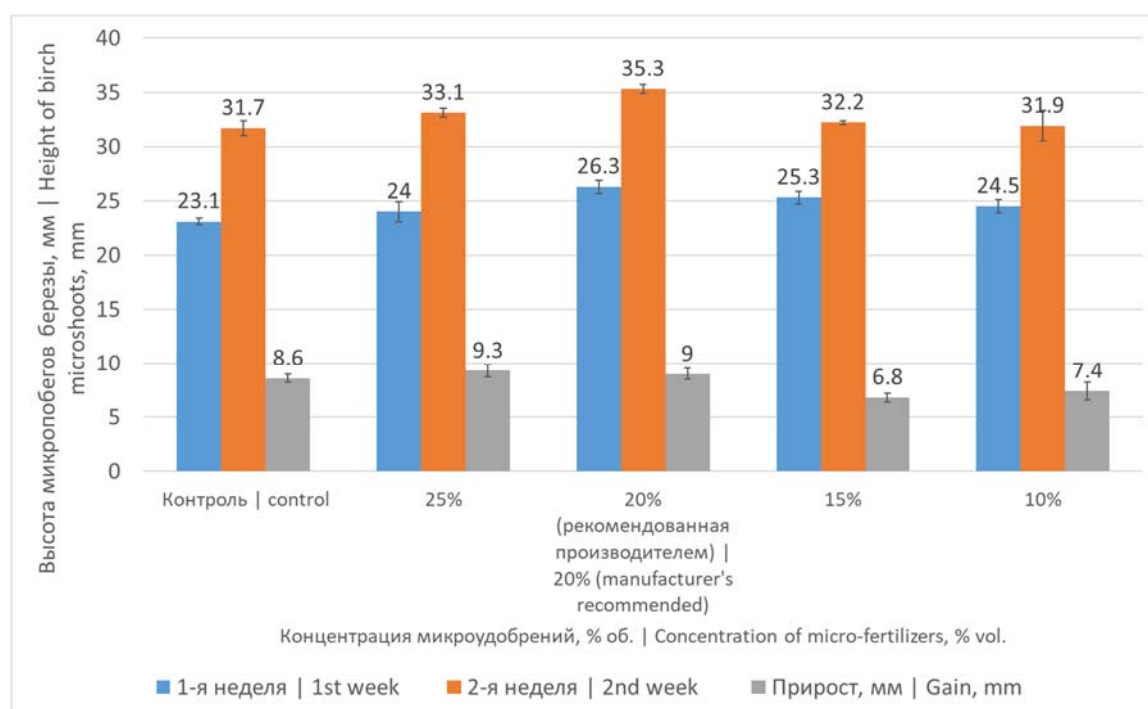


Рисунок 3. Использование микроудобрений на основе водорослей с Сейшельских островов в качестве добавки в составе питательной среды WPM для стадии мультипликации березы пушистой 15-1 (*Betula pubescens* Ehrh.) (n = 30, M±SEM; г. Воронеж, Воронежская обл., 2023 год)

Figure 3. Use of algae-based microfertilizers from the Seychelles as an additive in the WPM nutrient medium for the multiplication stage of downy birch 15-1 (*Betula pubescens* Ehrh.) (n = 30, M±SEM; Voronezh, Voronezh region, 2023 year)

Источник: собственная композиция автор(ов)

Source: author's composition

Включение в состав компонентов питательной среды WPM для процесса мультипликации микроудобрений на основе водорослей с Сейшельских островов позволяет сделать следующие заключения:

1. Применение микроудобрений в концентрации рекомендованной производителем 20 % и 25 % в течение двух недель приводило к ускорению ростовых процессов у опытных микрорастений березы по сравнению с контрольными растениями. При этом прирост опытных микрорастений составлял соответственно 9.0 и 9.3мм, тогда как у контроля он составлял 8,6 мм.

2. Исследование динамики ростовых процессов у опытных микрорастений березы

пушистой 15-1 с добавками в питательную среду микроудобрений с более низкими концентрациями 10 % и 15 % не позволило выявить положительного влияния.

Таким образом, для использования микроудобрений на основе водорослей в технологии клонального микроразмножения *in vitro* на стадии мультипликации рекомендуются применение концентрации 20 % и 25 %.

Влияние микроудобрений было также проанализировано на растениях, переведенных в условия закрытого грунта. После двух месяцев эксперимента оценивали параметры роста у растений, обработанных и необработанных микроудобрениями (рис. 3, табл. 3).



Рисунок 3. Внешний вид растений березы пушистой, переведенных в условия закрытого грунта, на момент окончания эксперимента: слева – контрольная группа, справа – опытная группа

Figure 3. Appearance of downy birch potted plants transferred to greenhouse conditions at the end of the experiment: on the left – control group, on the right – experimental group

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 3

Воздействие микроудобрений на основе водорослей с Сейшельских островов в качестве внекорневой подкормки при выращивании березы пушистой 15-1 с ЗКК (n = 30, M±SEM; Voronezh, Voronezh region, 2023)

Table 3

The impact of microfertilizers based on algae from the Seychelles as foliar feeding when growing downy birch 15-1 with a closed root system (n = 30, M±SEM; Voronezh, Voronezh region, 2023)

Вариант	Высота растения, мм			Прирост, мм
	на начало опыта, 25 апреля	26 июня	10 июля	
Контроль	1.96±0.18	18.1±2.12	36.8±3.43	34.8±3,04
Опыт (концентрация, рекомендованная производителем, 20%)		26.0±3.71	46.5±3.27	44.5±3,27

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Использование микроудобрений на основе водорослей с концентрацией, рекомендованной производителем 20 % для доращивания микрорастений березы пушистой 15-1 с закрытой корневой системой в условиях теплиц, позволило достоверно установить ускорение ростовых процессов у опытных растений. Так, высота саженцев березы пушистой у опытных растений к двум месяцам выращивания со-

ставляла 26.0±3.71 мм, что на 44 % превышает высоту контрольных растений. Подобная тенденция сохранялась до конца эксперимента (до 10 июля).

Прирост опытных растений березы за все время исследования составил 44.5 мм, тогда как у контрольных он ниже на 9.7 мм.

Для успешного внесения биопрепарата в агроценоз растений в качестве стимулятора

роста и развития важно учитывать, что он не должен нарушать гомеостаз сложившейся экосистемы. Это значит, что он не должен оказывать губительного воздействия на представителей полезной почвенной микрофлоры, так называемые PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria – ризобактерии, способствующие росту и развитию растений). Изучено действие биопрепарата на свободноживущие азотфиксаторы и диазотрофы, участвующие в фиксации атмосферного азота (*Azotobacter chroococcum*, *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp., *Agrobacterium* sp.), стимуляторы роста растений (*Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*), актиномицеты. Отсутствие зон ингибирования роста и развития изучаемых групп микроорганизмов свидетельствует о том, что биопрепарат не оказывал негативного воздействия на баланс основных эколого-трофических групп микробиоты, участвующей в обеспечении почвенного плодородия.

Таким образом, полученные результаты исследования по использованию микроудобрений на основе водорослей в качестве внекорневой подкормки при доращивании березы пушистой 15-1 позволяют сделать вывод о стимулирующем влиянии изученных микроудобрений на ростовые процессы изученных растений и отсутствии негативного влияния на представителей полезной почвенной микрофлоры, и рекомендовать их использование при

выращивании стандартного посадочного материала древесных растений, размноженных по технологии *in vitro*.

### Заключение

Проведенные исследования по влиянию микроудобрений Seaweed Seychelles Liquid<sup>®</sup> показали положительный эффект их воздействия на древесные растения на примере березы пушистой. Стимуляция ростовых процессов наблюдалась как на стадии *in vitro* клонирования эксплантов, так и при адаптации растений к нестерильным условиям при выращивании в теплице. Степень воздействия органических удобрений на растения зависела от концентрации. Более низкие значения (10 и 15 %) не оказали значительного влияния на прирост *in vitro* клонов березы, в то время как концентрация, рекомендованная производителем (20 %), и 25 % содержания микроудобрений имели выраженный стимулирующий эффект. Полученные результаты по активации ростовых процессов березы пушистой и отсутствие ингибирования представителей полезной почвенной микрофлоры с использованием микроводорослей позволяют рекомендовать использование органических удобрений при культивировании древесных растений *in vitro* и при переводе в нестерильные условия теплицы. Концентрация, рекомендованная производителем, может быть использована при культивировании древесных растений.

### Список литературы

1. Ghareeb R. Y., Shams El-Din N. G. E. D., Maghraby D. M. E., Ibrahim D. S., Abdel-Megeed A., Abdelsalam N. R. Nematicidal activity of seaweed-synthesized silver nanoparticles and extracts against *Meloidogyne incognita* on tomato plants. *Scientific reports*. 2022;12(1):3841. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06600-1>.
2. Farghali M., Mohamed I. M. A., Osman A.I., Rooney D. W. Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: a review. *Environ Chem Lett*. 2023;21:97. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01520-y>.
3. Grammenou A., Petropoulos S. A., Thalassinou G., Rinklebe J., Shaheen S. M., Antoniadis V. Biostimulants in the Soil-Plant Interface: Agro-environmental Implications—A Review. *Earth Syst Environ*. 2023;7:583. <https://doi.org/10.1007/s41748-023-00349-x>.

4. Ключкова Т. А., Климова А. В., Ключкова Н. Г. Перспективы использования камчатских ламинариевых водорослей в региональном растениеводстве. *Вестник Камчатского государственного технического университета*. 2019;48: 90. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-kamchatskih-laminariyevyh-vodorosley-v-regionalnom-rastenievodstve>.
5. Ren C. G., Liu Z. Y., Wang X. L., Qin S. The seaweed holobiont: from microecology to biotechnological applications. *Microbial Biotechnology*. 2022;15(3):738. DOI: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14014>.
6. Yalçın S., Şükran Okudan E., Karakaş Ö., Önem A. N., Sözgen Başkan K. Identification and quantification of some phytohormones in seaweeds using UPLC-MS/MS. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*. 2019;42(15-16):475. DOI: <https://doi.org/10.1080/10826076.2019.1625374>.
7. Agarwal P. K., Dangariya M., Agarwal P. Seaweed extracts: Potential biodegradable, environmentally friendly resources for regulating plant defence. *Algal Research*. 2021;58:102363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102363>.
8. Parab A., Shankhadarwar S. Growth enhancement of agricultural crops using seaweed liquid fertilizer. *Plant Science Today*. 2022;9(2):322. DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.1439>.
9. Esserti S., Faize M., Rifai L. A., Smaili A., Belfaiza M., Faize L., Albuquerque N., Burgos L., Koussa T., Makroum K. Media derived from brown seaweeds *Cystoseira myriophylloides* and *Fucus spiralis* for *in vitro* plant tissue culture. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2017;128: 437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-016-1121-3>.
10. Sumangala K., Srikrishnah S., Sutharsan S. Roses Growth and Flowering Responding to Concentration and Frequency of Seaweed (*Sargassum crassifolium* L.) Liquid Extract Application. *Current agriculture research journal*. 2019;7(2): 236. DOI: <http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.7.2.11>.
11. Pascual P. R. L., Carabio D. E., Abello N. F. H., Remedios E. A., Pascual V. U. Enhanced assimilation rate due to seaweed biostimulant improves growth and yield of rice bean (*Vigna umbellata*). *Agronomy research*. 2021;19(4):1863. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.21.106>.
12. Dookie M., Ali O., Ramsbhag A., Jayaraman J. Flowering gene regulation in tomato plants treated with brown seaweed extracts. *Scientia Horticulturae*. 2021;276:109715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109715>.
13. Loconsole D, Cristiano G, De Lucia B. Improving Aerial and Root Quality Traits of Two Landscaping Shrubs Stem Cuttings by Applying a Commercial Brown Seaweed Extract. *Horticulturae*. 2022;8(9):806. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8090806>.
14. Ali O., Ramsbhag A., Jayaraman J. Biostimulant Properties of Seaweed Extracts in Plants: Implications towards Sustainable Crop Production. *Plants*. 2021;10(3):531. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10030531>.
15. Mukherjee A., Patel J.S. Seaweed extract: biostimulator of plant defense and plant productivity. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2020;17:553. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02442-z>.
16. Vicente TFL, Félix C, Félix R, Valentão P, Lemos MFL. Seaweed as a Natural Source against Phytopathogenic Bacteria. *Marine Drugs*. 2023; 21(1):23. <https://doi.org/10.3390/md21010023>.
17. Deolu-Ajayi A. O., Van der Meer I. M., Van der Werf A., Karlova R. The power of seaweeds as plant biostimulants to boost crop production under abiotic stress. *Plant, Cell & Environment*. 2022;45(9):2537. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.14391>.
18. Do Rosário Rosa V., Dos Santos A. L. F., da Silva A. A., Sab M. P. V., Germino G. H., Cardoso F. B., de Almeida Silva M. Increased soybean tolerance to water deficiency through biostimulant based on fulvic acids and *Ascophyllum nodosum* (L.) seaweed extract. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021;158:228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.008>.
19. Grodetzkaya TA, Evlakov PM, Fedorova OA, Mikhin VI, Zakharova OV, Kolesnikov EA, Evtushenko NA, Gusev AA. Influence of Copper Oxide Nanoparticles on Gene Expression of Birch Clones *In Vitro* under Stress Caused by Phytopathogens. *Nanomaterials*. 2022;12(5):864. <https://doi.org/10.3390/nano12050864>.



20. Теппер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2014, 255 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/MLDLepImwueOH>.

### References

1. Ghareeb R. Y., Shams El-Din N. G. E. D., Maghraby D. M. E., Ibrahim D. S., Abdel-Megeed A., Abdelsalam N. R. Nematicidal activity of seaweed-synthesized silver nanoparticles and extracts against *Meloidogyne incognita* on tomato plants. *Scientific reports*. 2022;12(1):3841. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06600-1>.
2. Farghali M., Mohamed I. M. A., Osman A.I., Rooney D. W. Seaweed for climate mitigation, wastewater treatment, bioenergy, bioplastic, biochar, food, pharmaceuticals, and cosmetics: a review. *Environ Chem Lett*. 2023;21:97. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01520-y>.
3. Grammenou A., Petropoulos S. A., Thalassinos G., Rinklebe J., Shaheen S. M., Antoniadis V. Biostimulants in the Soil–Plant Interface: Agro-environmental Implications—A Review. *Earth Syst Environ*. 2023;7:583. <https://doi.org/10.1007/s41748-023-00349-x>.
4. Klochkova T. A., Klimova A. V., Klochkova N. G. Prospects for the use of Kamchatka kelp algae in regional crop production. *Bulletin of Kamchatka State Technical University*. 2019;48:90. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-kamchatskih-laminariyevyh-vodorosley-v-regionalnom-rastenievodstve>.
5. Ren C. G., Liu Z. Y., Wang X. L., Qin S. The seaweed holobiont: from microecology to biotechnological applications. *Microbial Biotechnology*. 2022;15(3):738. DOI: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14014>.
6. Yalçın S., Şükran Okudan E., Karakaş Ö., Önem A. N., Sözgen Başkan K. Identification and quantification of some phytohormones in seaweeds using UPLC-MS/MS. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*. 2019;42(15-16):475. DOI: <https://doi.org/10.1080/10826076.2019.1625374>.
7. Agarwal P. K., Dangariya M., Agarwal P. Seaweed extracts: Potential biodegradable, environmentally friendly resources for regulating plant defence. *Algal Research*. 2021;58:102363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102363>.
8. Parab A., Shankhadarwar S. Growth enhancement of agricultural crops using seaweed liquid fertilizer. *Plant Science Today*. 2022;9(2):322. DOI: <https://doi.org/10.14719/pst.1439>.
9. Esserti S., Faize M., Rifai L. A., Smaili A., Belfaiza M., Faize L., Albuquerque N., Burgos L., Koussa T., Makroum K. Media derived from brown seaweeds *Cystoseira myriophylloides* and *Fucus spiralis* for *in vitro* plant tissue culture. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. 2017;128: 437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-016-1121-3>.
10. Sumangala K., Srikrishnah S., Sutharsan S. Roses Growth and Flowering Responding to Concentration and Frequency of Seaweed (*Sargassum crassifolium* L.) Liquid Extract Application. *Current agriculture research journal*. 2019;7(2): 236. DOI: <http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.7.2.11>.
11. Pascual P. R. L., Carabio D. E., Abello N. F. H., Remedios E. A., Pascual V. U. Enhanced assimilation rate due to seaweed biostimulant improves growth and yield of rice bean (*Vigna umbellata*). *Agronomy research*. 2021;19(4):1863. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.21.106>.
12. Dookie M., Ali O., Ramsuhag A., Jayaraman J. Flowering gene regulation in tomato plants treated with brown seaweed extracts. *Scientia Horticulturae*. 2021;276:109715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109715>.
13. Loconsole D, Cristiano G, De Lucia B. Improving Aerial and Root Quality Traits of Two Landscaping Shrubs Stem Cuttings by Applying a Commercial Brown Seaweed Extract. *Horticulturae*. 2022;8(9):806. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8090806>.
14. Ali O., Ramsuhag A., Jayaraman J. Biostimulant Properties of Seaweed Extracts in Plants: Implications towards Sustainable Crop Production. *Plants*. 2021;10(3):531. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10030531>

15. Mukherjee A., Patel J.S. Seaweed extract: biostimulator of plant defense and plant productivity. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2020;17:553. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02442-z>.

16. Vicente TFL, Félix C, Félix R, Valentão P, Lemos MFL. Seaweed as a Natural Source against Phytopathogenic Bacteria. *Marine Drugs.* 2023; 21(1):23. <https://doi.org/10.3390/md21010023>.

17. Deolu-Ajayi A. O., Van der Meer I. M., Van der Werf A., Karlova R. The power of seaweeds as plant biostimulants to boost crop production under abiotic stress. *Plant, Cell & Environment.* 2022;45(9):2537. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.14391>.

18. Do Rosário Rosa V., Dos Santos A. L. F., da Silva A. A., Sab M. P. V., Germino G. H., Cardoso F. B., de Almeida Silva M. Increased soybean tolerance to water deficiency through biostimulant based on fulvic acids and *Ascophyllum nodosum* (L.) seaweed extract. *Plant Physiology and Biochemistry.* 2021;158:228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.008>.

19. Grodet'skaya TA, Evlakov PM, Fedorova OA, Mikhin VI, Zakharova OV, Kolesnikov EA, Evtushenko NA, Gusev AA. Influence of Copper Oxide Nanoparticles on Gene Expression of Birch Clones *In Vitro* under Stress Caused by Phytopathogens. *Nanomaterials.* 2022;12(5):864. <https://doi.org/10.3390/nano12050864>.

20. Tepper E.Z., SHil'nikova V.K., Pereverzeva G.I. Praktikum po mikrobiologii. Moscow, Drofa, 2014, 255 p. (In Russ.). URL: <https://djvu.online/file/MLDLepImwueOH>.

### Сведения об авторах

✉ *Евлаков Петр Михайлович* – кандидат биол. наук, заведующий лабораторией анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: [peter.evlakov@yandex.ru](mailto:peter.evlakov@yandex.ru).

*Робенсон Бернанд Порт-Луи* – директор ООО «Морские водоросли Сейшельских островов»

*Бенжамин Бернанд Порт-Луи* – президент НКО «Развитие возможностей для молодежи на Сейшельских островах»

✉ *Гродецкая Татьяна Александровна* – научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5448-2792>, e-mail: [tatyana.pokusina@yandex.ru](mailto:tatyana.pokusina@yandex.ru).

*Федорова Ольга Анатольевна* – кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7581-6141>, e-mail: [fed-olga78@mail.ru](mailto:fed-olga78@mail.ru).

*Рыжкова Владлена Сергеевна* – младший научный сотрудник лаборатории анализа ПЦР, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-9727-3088>, e-mail: [vladlena.r11@yandex.ru](mailto:vladlena.r11@yandex.ru).

### Information about the authors

✉ *Peter M. Evlakov* – PhD, Head of the Laboratory of PCR analysis, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: [peter.evlakov@yandex.ru](mailto:peter.evlakov@yandex.ru).

*Robenson Bernard Port-Louis* – Director of Seychelles Seaweed LLC

*Benjamin Bernard Port-Louis* – President of Youth non-profit organization “Youth Empowerment Seychelles”



✉ *Tatiana A. Grodetskaya* – Researcher of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5448-2792>, e-mail: [tatyana.pokusina@yandex.ru](mailto:tatyana.pokusina@yandex.ru)

*Olga A. Fedorova* – PhD, Researcher of the Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7581-6141>, e-mail: [fed-olga78@mail.ru](mailto:fed-olga78@mail.ru)

*Vladlena S. Ryzhkova* – Junior Researcher of the Laboratory of PCR analysis, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: [peter.evlakov@yandex.ru](mailto:peter.evlakov@yandex.ru)

✉ – *Для контактов/Corresponding author*

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/3>

УДК 630 + 53.087.92:538.956



## Разность потенциалов в стволах березы повислой (*Betula pendula* Roth): особенности процессов релаксации при изменении температуры окружающей среды

Николай Н. Матвеев<sup>1</sup>, [nmtv@vglta.vrn.ru](mailto:nmtv@vglta.vrn.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>

Нина С. Камалова<sup>1</sup>, [rcamel@yandex.ru](mailto:rcamel@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>

Виктор И. Лисицын<sup>1</sup> , [viktor-lisicyn@yandex.ru](mailto:viktor-lisicyn@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

Наталья Ю. Евсикова<sup>1</sup>, [evsikovany\\_phlt@vgltu.ru](mailto:evsikovany_phlt@vgltu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>

Хоай Тхыонг Нгуен<sup>2</sup>, [nguyenthuongfee@iuh.edu.vn](mailto:nguyenthuongfee@iuh.edu.vn), <https://orcid.org/0000-0003-1290-5221>

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

<sup>2</sup>Промышленный университет Хошимина, Нгуен Ван Бао 12, г. Хошимин, 700000, Вьетнам

Суточная динамика разности потенциалов, возникающей в древесине ствола березы повислой (*Betula pendula* Roth) при перепадах температуры окружающей среды дает возможность моделирования динамики процессов перераспределения ионов солей в порках. Анализ результатов измерений разности потенциалов в древесине ствола модельного дерева показал, что ее динамика носит релаксационный характер и стремится к некоторому стационарному значению. На базе данных натуральных измерений разности потенциалов в рамках классической электродинамики построена формализованная модель динамики относительной разности потенциалов, содержащая три параметра. В результате вычислительного эксперимента, использующего оптимизационную процедуру на основе критерия Нэша-Сатклиффа, рассчитаны параметры вызванного изменением температуры окружающей среды релаксационного процесса формирования вдоль ствола березы устойчивой разности потенциалов. Выявлено, что динамическое равновесие потоков перераспределения зарядов определяется факторами стимулирующих и стабилизирующих процессов внутри стволов древесных растений. Показано, что грамотное сочетание результатов мониторинга разности потенциалов в стволах деревьев и вычислительного эксперимента позволит сформировать обширную базу параметров процессов формирования устойчивого динамического равновесия потоков ионов солей в них в зависимости от особенностей произрастания, суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды и состава почвы. Исследование изменения состояния деревьев вследствие отклика на воздействие различных факторов окружающей среды дает возможность расширить спектр инструментов для систем прогнозирования возникновения в лесных экосистемах катастрофических ситуаций.

**Ключевые слова:** разность потенциалов, береза повислая, *Betula pendula* Roth, флуктуации температуры окружающей среды, формализованное моделирование, потоки растворов солей.

**Финансирование:** исследование проведено в рамках работы по теме «Калибровка цифрового устройства по определению разности потенциалов в стволах деревьев», поддержанной локальным грантом ФГБОУ ВО ВГЛТУ.

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи, членов Научно-технического Совета ФГБОУ ВО ВГЛТУ и лично проректора по науке и инновациям профессора С.С. Морковину за поддержку исследований.

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


**Для цитирования:** Разность потенциалов в стволах березы повислой (*Betula pendula* Roth): особенности процессов релаксации при изменении температуры окружающей среды / Н. Н. Матвеев, Н. С. Камалова, В. И. Лисицын, Н. Ю. Евсикова, Хоай Тхыонг Нгуен // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 30–40. – Библиогр.: с. 36–39 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/3>.


*Поступила* 18.08.2023. *Пересмотрена* 30.10.2023. *Принята* 13.11.2023. *Опубликована онлайн* 30.11.2023.


Article

### Potential difference in trunks of silver birch (*Betula pendula* Roth): features of relaxation processes at changes in ambient temperature

Nikolai N. Matveev<sup>1</sup>, [nmtv@vglta.vrn.ru](mailto:nmtv@vglta.vrn.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>

Nina S. Kamalova<sup>1</sup>, [rcamel@yandex.ru](mailto:rcamel@yandex.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>

Viktor I. Lisitsyn<sup>1</sup> ✉, [viktor-lisicyn@yandex.ru](mailto:viktor-lisicyn@yandex.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

Natalya Yu. Evsikova<sup>1</sup>, [evsikovany\\_phlt@vgltu.ru](mailto:evsikovany_phlt@vgltu.ru),  <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>

Hoai Thuong Nguyen<sup>2</sup>, [nguyenthuongfee@iuh.edu.vn](mailto:nguyenthuongfee@iuh.edu.vn),  <https://orcid.org/0000-0003-1290-5221>

<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>Industrial University of Ho Chi Minh City, Nguyen Van Bao 12, Ho Chi Minh City, 700000, Vietnam

#### Abstract

The daily dynamics of the potential difference arising in the wood of the trunk of the hanging birch (*Betula pendula* Roth) at ambient temperature changes makes it possible to simulate the dynamics of the processes of redistribution of salt ions in the pores. An analysis of the results of measuring the potential difference in the wood of the model tree trunk showed that its dynamics is of a relaxation nature and tends to a certain stationary value. On the basis of the data of full-scale measurements of the potential difference in the framework of classical electrodynamics, a formalized model of the dynamics of the relative potential difference was constructed, containing three parameters. As a result of a computational experiment using an optimization procedure based on the Nash-Sutcliffe criterion, the parameters of the relaxation process of formation of a stable potential difference along the birch trunk caused by a change in the ambient temperature were calculated. It was revealed that the dynamic balance of the charge redistribution flows is determined by the factors of stimulating and stabilizing processes inside the trunks of woody plants. It is shown that a competent combination of the results of monitoring the potential difference in tree trunks and a computational experiment will make it possible to form an extensive database of parameters for the processes of formation of a stable dynamic equilibrium of salt ion fluxes in them, depending on the characteristics of growth, daily and seasonal changes in ambient temperature and soil composition. The study of changes in the state of trees due to the response to the impact of various environmental factors makes it possible to expand the range of tools for predicting the occurrence of catastrophic situations in forest ecosystems.

**Keywords:** *potential difference, Betula pendula* Roth, *ambient temperature fluctuations, formalized modeling, salt solution currents.*

**Funding:** the research was carried out as part of the work on the topic “Calibration of a digital device for determining the potential difference in tree trunks” supported by a local grant from the FSBEI HE VSUFT.

**Acknowledgments:** authors thank the reviewers for their contribution to the peer review and members of the Scientific and Technical Council of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov and personally the Vice-Rector for Science and Innovations Prof. S.S. Morkovina for the support of research.

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

**For citation:** Matveev N. N., Kamalova N. S., Lisitsyn V. I., Evsikova N. Yu., Hoai Thuong Nguyen (2023). Potential difference in trunks of silver birch (*Betula pendula* Roth): features of relaxation processes at changes in ambient temperature. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 30-40 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/3>.

**Received** 18.08.2023. **Revised** 30.10.2023. **Accepted** 13.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

### Введение

Необходимость разработки имеющих контролируемую точность технологий неразрушающего мониторинга состояния таких сложных самоорганизующихся систем, как лесные массивы, стимулирует исследование физических процессов в стволах деревьев при изменении физических факторов окружающей среды (температуры и влажности). Отсутствие таких методов – одна из причин сложностей, возникающих при разработке систем прогнозирования пожарной опасности или экологических катастрофических ситуаций, а также систем контроля процессов лесовосстановления, факторного анализа формирования устойчивого состояния лесного массива, как единой сложной системы.

В настоящее время для наблюдения за состоянием сложных биосистем (в частности, лесных массивов) используются комплексы, измеряющие температуру и влажность окружающей среды [1-3]. Для мониторинга водного стресса в лесах применяются методы дистанционного зондирования [4]. При наблюдении за растительностью принцип дистанционного зондирования предполагает использование датчиков для измерения различных длин волн электромагнитного излучения, излучаемого или отражаемого растениями и окружающей их средой, поскольку здоровая растительность характерным образом отражает и поглощает различные длины волн, что может быть обнаружено с помощью оптических приборов [5]. Существуют методики комплексной оценки состояния лесных массивов, комбинирующие методы наземного и дистанционного обследования [6,7]. Таким образом, мониторинг осуществляется на основе косвенных наблюдений, что значительно снижает эффектив-

ность систем прогнозирования катастрофических ситуаций. Развитие цифровых технологий позволяет разрабатывать электроизмерительные приборы (датчики) для определения изменения состояния древесных растений (основных составляющих лесных массивов) с контролируемой точностью [8,9]. Например, для определения изменения влажности или концентрации электролитов в древесной ткани предлагается применять томографию удельного электрического сопротивления [10,11]. В обзоре [12] показано применение метода измерения удельного сопротивления с использованием кольцевой матрицы игольчатых электродов для визуализации внутренних электрических структур стволов живых стоячих деревьев. Анализ результатов измерения электрического сопротивления для изучения растительных тканей описывается в работе [13]. В статье [14] приводится метод определения относительной жизненной силы деревьев, основанный на интерпретации образцов электрического сопротивления, полученных с помощью шигметра – измерителя импульсного тока. Эти методики рассматривают древесину ствола как проводник с неоднородной проводимостью и основаны на корреляции между влажностью и сопротивлением. С другой стороны, активно разрабатываются методы анализа отклика древесных растений на воздействие факторов окружающей среды по измерению непосредственно внеклеточной разности потенциалов. Например, измерение разности потенциалов между корнями и черешком листа предлагается применять для мониторинга физиологических реакций деревьев на содержание влаги в почве [15]. Суточные колебания распределения потенциала в стволе дерева, летом

связанные также с сокодвижением, изучались в работе [16].

Сравнительно недавно выяснилось, что при перепаде температуры окружающей среды в древесине стволов деревьев формируется разность потенциалов, величина которой зависит от их жизненного состояния и влажности [17-19]. Таким образом, измерение разности потенциалов в стволах можно использовать для неразрушающего контроля состояния деревьев.

Целью настоящей работы является формирование концепции моделирования стимулированных изменением температуры окружающей среды потоков ионов солей в порах древесины вдоль стволов древесных растений на основе фундаментальных физических законов. Решаемая задача – разработка метода формализованного моделирования алгоритма определения основных параметров динамики процесса формирования вдоль ствола дерева стационарной разности потенциалов, характеризующей его устойчивое состояние.

#### Материалы и методы

В качестве модельного было выбрано здоровое дерево березы повислой (*Betula pendula* Roth.) возрастом 55 лет, произрастающее в порослевой дубраве Учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ. В течение трех суток в дневные часы с 8:30 до 20:00 измерялись значения температуры окружающей среды и разности потенциалов вдоль ствола между точками, расположенными на высоте 1.3 м и 3 м от поверхности земли.

Для измерения использовался портативный цифровой прибор – мультиметр МУ 62. Стабильные показания прибора обеспечивались путем вживления на выбранных высотах в древесину на одинаковых расстояниях от центра ствола изолированных до поверхности контакта (4-5 мм) стальных измерительных электродов диаметром 5 мм. Электроды соединялись с мультиметром посредством гибкого провода. Методика измерений базируется на явлении поляризации вещества древесины под действием температурных градиентов [17-19]. Этот метод в принципе отличается описанного в работе [20].

#### Результаты и обсуждение

Черными маркерами на рисунке 1 показаны результаты наблюдения динамики разности потенциалов  $U$ , нормированной на максимальное значение за время наблюдения  $U_{\max}$ . Из рисунка видно качественное повторение картины в течение трех дней наблюдения [23], что косвенно свидетельствует о корреляции исследуемых зависимостей с процессом формирования устойчивого состояния древесного растения. При увеличении температуры в течение часа на 18 % разность потенциалов плавно увеличивалась в течение 6-7 часов на 40-50%, а затем оставалась неизменной до конца времени наблюдения.

Известно, что древесина является пористой структурой. Моделирование механизмов формирования устойчивой разности потенциалов будем осуществлять в рамках классической физики. В основу концепции моделирования положим обоснованное предположение, что в древесных порах в течение времени наблюдения протекают токи ионов солей, вызванные неоднородностью распределения их количества вдоль ствола ( $dN$ ) вследствие процессов жизнедеятельности дерева и влияния факторов окружающей среды (например, изменения температуры). На основе закона Фика для плотности потока ионов солей в порах древесины  $j$  можно записать соотношение:

$$jdt = D dN / \sigma \Delta x, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – суммарная площадь пор,  $\Delta x$  – расстояние между электродами,  $D$  – коэффициент диффузии в биокompозите. С другой стороны, плотность потока определяется концентрацией и тепловой скоростью ионов  $V_T$ , величина которой изменяется при флуктуации температуры окружающей среды как

$$j = nV_T, \quad (2)$$

где  $n = N / \sigma \Delta x$  – концентрация ионов. Соотношение (1) после небольших математических преобразований с учетом (2) преобразуется в

$$\frac{dN}{N} = \eta dt, \quad (3)$$

где параметр  $\eta = V_T / D$  характеризует отношение влияний на процесс перераспределения ионов солей внутри ствола температурных градиентов и диффузии. Поскольку неизбежность формирования

динамического равновесия потоков внутри ствола физически обоснована ограниченностью количества ионов, то логично предположить, что величина параметра  $\eta$  будет уменьшаться с ростом числа ионов  $N$ , участвующих в сформированном потоке. В линейном приближении  $\eta$  можно представить в виде:

$$\eta = \eta_0 - \kappa N, \quad (4)$$

где  $\kappa$  – параметр определяемый стабилизирующими динамическое равновесие потоками внутри ствола.

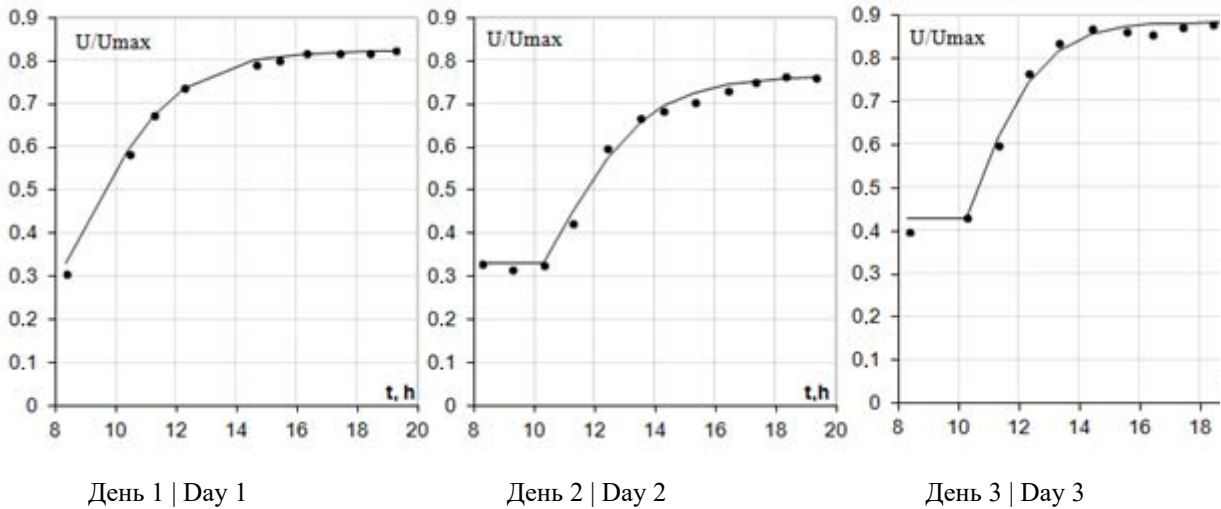


Рисунок 1. Динамика формирования вдоль ствола березы устойчивой разности потенциалов при изменении температуры окружающей среды в течение трех дней наблюдения.

Figure 1. Dynamics of the formation of a stable potential difference along a birch trunk with a change in ambient temperature during three days of observation.

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Соотношение (3) с учетом (4) является дифференциальным уравнением первого порядка, которое можно решить аналитически с начальным условием  $N = N_0$  при  $t = 0$ :

$$N = \frac{N_0 e^{\eta_0 t}}{1 + \chi(e^{\eta_0 t} - 1)}, \quad (5)$$

где введено обозначение  $\chi = \kappa N_0 / \eta_0$ .

В рамках общего физического подхода в предлагаемых условиях с большой вероятностью можно полагать равенство отношений

$$\frac{N}{N_{\max}} = \frac{n}{n_{\max}} = \frac{U}{U_{\max}}. \quad (6)$$

Из (6) с учетом (5) получаем соотношение

$$\frac{U}{U_{\max}} = \frac{U_0 e^{\eta_0 t} / U_{\max}}{1 + \chi(e^{\eta_0 t} - 1)}, \quad (7)$$

которое можно использовать для определения параметров  $U_0$ ,  $\kappa$  и  $\eta_0$ , применяя метод пошаговой

интерпретации результатов моделирования и данных, полученных при натурных измерениях.

Вычислительный эксперимент проводился с помощью разработанной программы [21], в которой модельная величина рассчитывалась по базовому соотношению (7), а оптимальность выбора параметров контролировалась с помощью критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (ME) [22]. Критерий определялся по результатам экспериментальных и вычислительных экспериментов как

$$ME = 1 - \frac{\sum (U(t)_n^{emp} - U(t)_n)^2}{\sum (U(t)_n^{emp} - U(t)_{mean})^2}, \quad (8)$$

где  $U(t)_n^{emp}$  – данные измерений разности потенциалов в стволе березы;  $U(t)_n$  – полученные в компьютерном эксперименте результаты;  $U(t)_{mean}$  – среднее арифметическое значение  $U(t)_n^{emp}$ . Иден-

тификация параметров осуществлялась при максимальной величине критерия  $ME$ .

Результаты вычислительного эксперимента показаны в табл. 1. В последнем столбце таблицы для сравнения приведено среднее относительное отклонение результатов вычислительного экспери-

мента от данных мониторинга. Близость критерия  $ME$  к единице дает достаточную долю уверенности в том, что соотношение (7) можно использовать для моделирования динамики разности потенциалов, возникающей вдоль ствола дерева под влиянием изменения температуры окружающей среды.

Результаты вычислительного эксперимента

Таблица 1

Table 1

Results of the computational experiment

	$\eta_0$	$\kappa$	$\eta_0/\kappa$	$U_0$	$ME$	$\varepsilon, \%$
день 1   day 1	0.65	0.79	0.823	0.33	0.997	0.07
день 2   day 2	0.65	0.851	0.764	0.33	0.993	1.66
день 3   day 3	0.84	0.95	0.884	0.43	0.991	1.73

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Моделирование позволяет прогнозировать разность потенциалов в любой момент времени (см. сплошные линии на рис. 1) и наблюдать за изменением процесса перераспределения ионов солей в порах древесины ствола с помощью электроизмерительных приборов. Анализ параметров показывает, что величина отношения  $\eta_0/\kappa$  определяется устойчивой величиной разности потенциалов (см. рис. 1). Следовательно, динамическое равновесие потоков перераспределения зарядов определяется параметрами стимулирующих и стабилизирующих процессов внутри ствола. Таким образом, предложенный подход, включающий грамотное сочетание результатов мониторинга разности потенциалов и вычислительного эксперимента, позволит сформировать обширную базу для параметров процессов формирования устойчивого динамического равновесия потоков ионов солей в порах ствола в зависимости от особенностей произрастания, суточных и сезонных изменений температуры окружающей среды и состава почвы.

Результаты исследования показывают обоснованность применения цифрового устройства, макет которого представлен в работе [23], для автоматического измерения через определенные промежутки времени разности потенциалов в стволах деревьев и накопления данных на цифровом носителе. Цифровой датчик был создан на базе автономного двухканального регистратора ECLERK-USB-2mV-G [26], который позволяет через равные

заданные временные интервалы автоматически измерять и архивировать значения напряжения в диапазоне до 50 мВ. Макет прибора удобно крепится к стволу дерева на соединительных проводах. Для расширения диапазона измерений разности потенциалов от 1 мВ до 1 В было разработано специальное согласующее устройство [26].

#### Заключение

Результаты проведенного исследования показывают, что предложенный подход к расчету параметров процессов формирования вдоль ствола дерева устойчивой разности потенциалов дает возможность сформировать базу данных для моделирования динамики процессов перераспределения ионов солей в порах. Очень важно, что накопление данных позволит не только внедрить цифровые технологии в мониторинг процессов формирования динамического равновесия потоков в древесине стволов, но также выработать базовую концепцию воздействия изменений температуры окружающей среды на состояние деревьев. Предложенная модель сочетает методы вычислительного эксперимента и данных мониторинга, полученных с контролируемой точностью. Возможность исследований влияния различных факторов окружающей среды на состояния деревьев позволит расширить спектр инструментов для формирования систем прогнозирования вероятности возникновения и развития катастрофических ситуаций в лесных экосистемах.

### Список литературы

1. Mahalingam, S. Wireless Sensor Based Forest Fire Early Detection with Online Remote Monitoring / S. Mahalingam, M. S. Deep, K. S. Krishna // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. – 2021. – Vol. 10, Iss. 5. – pp. 143–145. – DOI: <https://doi.org/10.35940/ijeat.E2670.0610521>.
2. Мониторинг гидротермического режима почвогрунтов с помощью инструмента Smat-Meter для измерения профилей влажности и температуры почвы / А. В. Базаров, С. А. Кураков, А. С. Базарова, Ю. Б. Башкуев // *Метеорология и гидрология*. – 2023. – № 3. – С. 129–131. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=54018972>.
3. Applications of low-cost environmental monitoring systems for fine-scale abiotic measurements in forest ecology / J. B. Cannon, L. T. Warren, G. C. Ohlson, J. K. Hiers, M. Shrestha, C. Mitra, E. M. Hill, S. J. Bradfield, T. W. Ocheltree // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2022. – Vol. 321. – Art. No. 108973. – <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108973>.
4. Le, T. S. Application of Remote Sensing in Detecting and Monitoring Water Stress in Forests / T. S. Le, R. Harper, B. Dell // *Remote Sensing*. – 2023. – Vol. 15, Iss. 13. – Art. No. 3360. – <https://doi.org/10.3390/rs15133360>.
5. A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing / P. Barmpoutis, P. Papaioannou, K. Dimitropoulos, N. Grammalidis // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20, Iss. 22. – Art. No. 6442. – <https://doi.org/10.3390/s20226442>.
6. Комплексная оценка состояния лесных генетических резерватов Свердловской области с помощью методов дистанционного и наземного обследования / С. А. Шавнин, В. А. Лебедев, В. А. Галако, В. Э. Власенко // *Лесной журнал*. – 2017. – № 1. – С. 104–118. – doi: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.104>. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=28140796>.
7. Determining fuel moisture thresholds to assess wildfire hazard: A contribution to an operational early warning system / J. P. Argañaraz, M. A. Landi, C. M. Scavuzzo, L. M. Bellis // *PLoS One*. – 2018. – Vol. 13, Iss. 10. – Art. No. 0204889. – doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204889>.
8. On the measurement of microclimate / I. M. D. Maclean, J. P. Duffy, S. Haesen, S. Govaert, P. De Frenne, T. Vanneste, J. Lenoir, J. J. Lembrechts, M. W. Rhodes, K. Van Meerbeek // *Methods in Ecology and Evolution* / – 2021. – Vol. 12, Iss. 8. – pp. 1397–1410. – <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13627>.
9. Rieder, J. S. Monitoring spatiotemporal soil moisture variability in the unsaturated zone of a mixed forest using electrical resistivity tomography / J. S. Rieder, C. Kneisel // *Vadose Zone Journal*. – 2023. – Vol. 22, Iss. 3. – Art. No. 20251. – doi: <https://doi.org/10.1002/vzj2.20251>.
10. Electrical resistivity tomography: patterns in *Betula pendula*, *Fagus sylvatica*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris* / A. Bär, M. Hamacher, A. Ganthaler, A. Losso, S. Mayr // *Tree Physiology*. – 2019. – Vol. 39, Iss. 7. – pp. 1262–1271. – doi: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz052>.
11. Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation / A. Ganthaler, J. Sailer, A. Bär, A. Losso, S. Mayr // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – Art. No. 1455. – doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01455>.
12. A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years : Perspectives for Mining Waste Monitoring / A. Dimech, L. Zh. Cheng, M. Chouteau, J. Chambers, S. Uhlemann, P. Wilkinson, Ph. Meldrum, B. Mary, G. Fabien-Ouellet, A. Isabelle // *Surveys in Geophysics*. – 2022. – Vol. 43. – pp. 1699–1759. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09731-2>.
13. Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation / A. Ganthaler, J. Sailer, A. Bär, A. Losso, S. Mayr // *Frontiers in Plant Science*. – 2019. – Vol. 10. – Art. No. 01455. – DOI <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01455>.
14. İçel, B. Kızılcım (*Pinus brutia* Ten.) popülasyonlarında odun yoğunluğu ve radyal büyüme performansının Shigometer ile belirlenebilme imkanının araştırılması / B. İçel // *Türkiye Ormancılık Dergisi*. – 2017. – Vol. 18, Iss. 3. – pp. 241–246. – DOI: <https://doi.org/10.18182/tjf.359640>.



15. Erazo-Mesa, E. Advances in Hass avocado irrigation scheduling under digital agriculture approach / E. Erazo-Mesa, A. Echeverri-Sánchez, J. G. Ramírez-Gil // *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. – 2022. – Vol. 16, No. 1. – Art. No. 13456. – <https://doi.org/10.17584/rcch.2022v16i1.13456>.

16. Electrical response of plants to environmental stimuli: A short review and perspectives for meteorological applications / M. V. Randriamandimboisa, N. A. M. N. Razafindralambo, D. Fakra, D. L. Ravoajanahary, J. C. Gatina, N. Jaffrezic-Renault // *Sensors International*. – 2020. – Vol. 1. – Art. No. 100053. – <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100053>.

17. Матвеев, Н. Н. Поляризационные явления в кристаллизующихся полимерах и биокмпозиционных материалах в неоднородном температурном поле : монография / Н. Н. Матвеев, Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова; Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г.Ф. Морозова. – Воронеж, 2022. – 311 с. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=48270456>.

18. The possible mechanism for the water transport in the tree trunks in early spring / N. N. Matveev, A. A. Rychkov, N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – Art. No. 012047. – doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012047>.

19. The mechanism of the appearance of a potential difference in the natural high-molecular heterostructures by natural temperature changes / N. N. Matveev, N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova, Yu. A. Litvinova, L. A. Litvinova // *Ferroelectrics*. – 2018. – Vol. 536, Iss. 1. – pp. 187-193. – doi: <https://doi.org/10.1080/00150193.2018.1497413>.

20. Биоэлектрохимические системы на основе электроактивности растений и микроорганизмов в корнеобитаемой среде (обзор) / Т. Э. Кулешова, А. С. Галушко, Г. Г. Панова, Е. Н. Волкова, W. Apollon, Ch. Shuang, S. Sevda // *Сельскохозяйственная биология*. – 2022. – Том 57, № 3. – С. 425-440. – doi: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.3.425rus>. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=49168079>.

21. Камалова, Н. С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665896. Расчетный комплекс по моделированию отклика древесины стволов древесных растений на перепад температуры окружающей среды : № 2019664997 : заявл. 22.11.2019 : опубл. 02.12.2019 / Н. С. Камалова, В. И. Лисицын, Н. Ю. Евсикова; правообладатель: Воронежский гос. лесотехн. ун-т им. Г. Ф. Морозова. – 2019. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=41532595>.

22. Лисицын, В. И. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода / В. И. Лисицын, М. В. Драпалюк, Н. Н. Матвеев // *Известия вузов. Лесной журнал*. – 2022. – № 3. – С. 213–225. – <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>. – <https://elibrary.ru/item.asp?id=48614799>.

23. Kamalova, N. S. Justification of the device operation principle for measuring the potential difference in tree trunks / N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing Ltd, 2020. – Vol. 595, Iss. 1. – Art. No. 012018. – doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012018>.

### References

1. Mahalingam S., Deep M. S., Krishna K. S. (2021) Wireless Sensor Based Forest Fire Early Detection with Online Remote Monitoring. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, Vol. 10, Iss. 5, pp. 143–145. DOI:10.35940/ijeat.E2670.0610521.

2. Bazarov A. V., Kurakov S. A., Bazarova A. S., Bashkuev Yu. B. (2023) A Tool for Monitoring Soil Hydrothermal Regimes. *Meteorologiya i Gidrologiya*, No. 3, pp. 129-131. (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=54018972>.

3. Cannon J. B., Warren L. T., Ohlson G. C., Hiers J. K., Shrestha M., Mitra C., Hill E. M., Bradfield S. J., Ocheltree T. W. (2022) Applications of low-cost environmental monitoring systems for fine-scale abiotic measurements in forest ecology. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 321, Art. No. 108973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108973>.

4. Le T. S., Harper R., Dell B. (2023) Application of Remote Sensing in Detecting and Monitoring Water Stress in Forests. *Remote Sensing*, Vol. 15, Iss. 13, Art. No. 3360. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15133360>.
5. Barmoutis P., Papaioannou P., Dimitropoulos K., Grammalidis N. (2020) A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing. *Sensors*, Vol. 20, Iss. 22, Art. No. 6442. <https://doi.org/10.3390/s20226442>.
6. Shavnin S. A., Lebedev V. A., Galako V. A., Vlasenko V. E. (2017) Integrated assessment of forest genetic reserves of the Sverdlovsk region by the methods of remote and ground survey. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], No. 1, pp. 104-118. (in Russian). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.104. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28140796>.
7. Argañaraz J. P., Landi M. A., Scavuzzo C. M., Bellis L. M. (2018) Determining fuel moisture thresholds to assess wildfire hazard: A contribution to an operational early warning system. *PLoS One*, Vol. 13, Iss. 10, Art. No. 0204889. DOI: 10.1371/journal.pone.0204889.
8. Maclean I. M. D., Duffy J. P., Haesen S., Govaert S., De Frenne P., Vanneste T., Lenoir J., Lembrechts J. J., Rhodes M. W., Van Meerbeek K. (2021) On the measurement of microclimate. *Methods in Ecology and Evolution*, Vol. 12, Iss. 8, pp. 1397-1410. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13627>.
9. Rieder J. S., Kneisel C. (2023) Monitoring spatiotemporal soil moisture variability in the unsaturated zone of a mixed forest using electrical resistivity tomography. *Vadose Zone Journal*, Vol. 22, Iss. 3, Art. No. 20251. DOI: 10.1002/vzj2.20251.
10. Wang H., Guan H., Guyot A., Simmons C. T., Lockington D. A. (2016) Quantifying sapwood width for three Australian native species using electrical resistivity tomography. *Ecohydrology*, Vol. 9, Iss. 1, pp. 83-92. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.1612>.
11. Ganthaler A., Sailer J., Bär A., Losso A., Mayr S. (2019) Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation. *Frontiers in Plant Science*, Vol. 10, Art. No. 1455. DOI: 10.3389/fpls.2019.01455.
12. Dimech A., Cheng L. Zh., Chouteau M., Chambers J., Uhlemann S., Wilkinson P., Meldrum Ph., Mary B., Fabien-Ouellet G., Isabelle A. (2022) A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years : Perspectives for Mining Waste Monitoring. *Surveys in Geophysics*, Vol. 43, pp. 1699–1759. DOI: 10.1007/s10712-022-09731-2.
13. Ganthaler A., Sailer J., Bär A., Losso A., Mayr S. (2019) Noninvasive Analysis of Tree Stems by Electrical Resistivity Tomography: Unraveling the Effects of Temperature, Water Status, and Electrode Installation. *Frontiers in Plant Science*, Vol. 10, Art. No. 01455. DOI <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01455>.
14. Icel B. (2017) Investigating the possibility of using Shigometer for determining wood density and radial growth performance among Turkish red pine (*Pinus brutia* Ten.) populations. *Turkish Journal of Forestry*, Vol. 18, Iss. 3, pp. 241-246. DOI: 10.18182/tjf.359640.
15. Erazo-Mesa E., Echeverri-Sánchez A., Ramírez-Gil J. G. (2022) Advances in Hass avocado irrigation scheduling under digital agriculture approach. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, Vol. 16, No. 1, Art. No. 13456. <https://doi.org/10.17584/rcch.2022v16i1.13456>.
16. Randriamandimisoa M. V., Razafindralambo N. A. M. N., Fakra D., Ravoajanahary D. L., Gatina J. C., Jaffrezic-Renault N. (2020) Electrical response of plants to environmental stimuli: A short review and perspectives for meteorological applications. *Sensors International*, Vol. 1, Art. No. 100053. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100053>.
17. Matveev N. N., Kamalova N. S., Evsikova N. Yu. (2022) Polarization phenomena in crystallizing polymers and biocomposite materials in a non-uniform temperature field : monograph. Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 311 p. (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=48270456>.
18. Matveev N. N., Rychkov A. A., Kamalova N. S., Evsikova N. Yu. (2019) The possible mechanism for the water transport in the tree trunks in early spring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 226, Art. No. 012047. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012047.

19. Matveev N. N., Kamalova N. S., Evsikova N. Yu., Litvinova Yu. A., Litvinova L. A. (2018) The mechanism of the appearance of a potential difference in the natural high-molecular heterostructures by natural temperature changes. *Ferroelectrics*, Vol. 536, Iss. 1, pp. 187-193. DOI: 10.1080/00150193.2018.1497413.

20. Kuleshova T. E., Galushko A. S., Panova G. G., Volkova E. N., Apollon W., Shuang Ch., Sevda S. (2022) Bioelectrochemical systems based on the electroactivity of plants and microorganisms in the root-inhabited environment (review). *Sel'skohozyajstvennaya biologiya* [Agricultural biology], Vol. 57, No. 3, pp. 425-440. (in Russian). doi: 10.15389/agrobiol.2022.3.425rus. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49168079>.

21. Kamalova N. S., Lisitsyn V. I., Evsikova N. Y. (2019) Certificate of Registration of Computer Program No. 2019665896. Computational complex for modeling the responsibility of temperature transfer of environmental temperature: No. 2019664997 : dec. 11/22/2019 : publ. 02.12.2019 / N. S. Kamalova, V. I. Lisitsyn, N. Y. Evsikova; copyright holder: Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. 2019. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41532595>.

22. Lisitsyn V. I., Drapalyuk M. V., Matveev N. N. (2022) Modeling the Forest Stand Growth Dynamics Based on the Thermodynamic Approach. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], No. 3, pp. 213–225. (in Russian). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48614799>.

23. Kamalova N. S., Evsikova N. Yu. (2020) Justification of the device operation principle for measuring the potential difference in tree trunks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing Ltd, 2020. Vol. 595, Iss. 1, *Art. No.* 012018. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012018.

### Сведения об авторах

*Матвеев Николай Николаевич* – доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>, e-mail: [nmtv@vglta.vrn.ru](mailto:nmtv@vglta.vrn.ru)

*Камалова Нина Сергеевна* – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>, e-mail: [rcamel@yandex.ru](mailto:rcamel@yandex.ru)

✉ *Лисицын Виктор Иванович* – кандидат физ.-мат. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, e-mail: [viktor-lisicyun@yandex.ru](mailto:viktor-lisicyun@yandex.ru)

*Евсикова Наталья Юрьевна* – кандидат ф.-м. наук, зав. кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>, e-mail: [evsikovany\\_phlt@vglta.vrn.ru](mailto:evsikovany_phlt@vglta.vrn.ru)

*Хоай Тхыонг Нгуен* – кандидат ф.-м. наук, преподаватель, научный сотрудник электротехнического факультета, Промышленный университет Хошимина, Нгуен Ван Бао 12, г. Хошимин, Вьетнам, 700000, <https://orcid.org/0000-0003-1290-5221>, e-mail: [nguyenthuongfee@iuh.edu.vn](mailto:nguyenthuongfee@iuh.edu.vn)

### Information about the authors

*Matveev Nikolay Nikolaevich* – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>, e-mail: [nmtv@vglta.vrn.ru](mailto:nmtv@vglta.vrn.ru)

*Kamalova Nina Sergeevna* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-8293-8593>, e-mail: [rcamel@yandex.ru](mailto:rcamel@yandex.ru)

✉ *Lisitsyn Victor Ivanovich* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva St., Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, e-mail: [viktor-lisicyn@yandex.ru](mailto:viktor-lisicyn@yandex.ru)

*Evsikova Natalia Yurievna* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0001-5288-0140>, e-mail: [evsikovany\\_phlt@vgtu.ru](mailto:evsikovany_phlt@vgtu.ru)

*Hoai Thuong Nguyen* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Lecturer, Researcher at the Faculty of Electrical Engineering Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City, Nguyen Van Bao 12, Ho Chi Minh City, Vietnam, 700000, <https://orcid.org/0000-0003-1290-5221>, e-mail: [nguyenthuongfee@iuh.edu.vn](mailto:nguyenthuongfee@iuh.edu.vn)

✉ – *Для контактов/Corresponding author*

Article

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/4>

УДК 630\*561



## Simple asymmetry indicators tested in natural even-aged Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Bulgaria

Roumen D. Petrin ✉, [lesni4eja2014@gmail.com](mailto:lesni4eja2014@gmail.com)  <http://orcid.org/0000-0002-5831-5983>

Forest Research Institute of the Bulgarian Academy of Sciences, 132, St. Kliment Ohridski Blvd., Sofia, 1756, Bulgaria

### Abstract

Based on 101 sample plots laid in Scots pine forest dendrocenoses aged 72 as an average with fulness around and over 0.7 has the structure in thickness, more exactly – the asymmetry of the distribution of tree numbers according to thickness, been investigated. Based on a retrospective analysis theoretically proved new indices have been introduced for finding and investigating this asymmetry, as well as a new indicator of asymmetry. The results obtained show that: a). The indices of asymmetry and the indicator of asymmetry, which proceeds from the indices, are in a close correlation ( $R^2 = 0.93; 0.94$ ) with the coefficients of asymmetry and are suitable for generalised comparative studies. b). The currently used generalised indicator of asymmetry – the zero natural indicator has a weaker correlation with the coefficient of asymmetry as compared with the correlation between the index of asymmetry and the indicator of asymmetry. c). The comparison between the indices of asymmetry for thickness structure and the indices of steepness for height structure has revealed a common trend as to inversely proportional change in these two kinds of indices and their correlation is  $R = 0.26$ . The general conclusion is that the indices and indicators of asymmetry are completely suitable and effective for generalised comparative studies such as, for example, the comparison between the structures in thickness and height of forest dendrocenoses.

**Keywords:** forest biometry, diametric distributions, *Pinus sylvestris* L., skewness, height curves, steepness.

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

**Acknowledgments:** the author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this paper.


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

**For citation:** Petrin R. D. (2023). Simple asymmetry indicators tested in natural even-aged Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in Bulgaria. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 41-55 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/4>.

**Received** 18.05.2023. **Revised** 03.11.2023. **Accepted** 13.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

Оригинальная статья

## Простые показатели асимметрии, использованные при исследовании естественных одновозрастных насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Болгарии

Румен Димитров Петрин ✉, lesni4eja2014@gmail.com  <http://orcid.org/0000-0002-5831-5983>

Научно-исследовательский институт леса Болгарской академии наук, бул. Климента Охридского, 132, г. София, 1756, Болгария

На основе 101 пробной площади в древостоях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) с возрастным диапазоном от 25 до 130 лет исследована асимметрия распределений деревьев по диаметру. На основании ретроспективного анализа предложены простые в использовании и подходящие для научных исследований строения лесных насаждений показатели – индекс асимметрии и показатель асимметрии. Предложенные показатели находятся в тесной корреляции друг с другом и могут считаться эквивалентными. Известный в более ранних публикациях специализированный показатель асимметрии – так называемый нулевой натуральный показатель, имеет с ними более слабую корреляцию. Предложенный индекс асимметрии диаметрального распределения обнаруживает обратную корреляцию с индексом крутизны кривых высот. Показатели могут применяться и пригодны для сравнительных исследований лесных дендроценозов по диаметру и высоте.

**Ключевые слова:** лесная биометрия, диаметральные распределения, *Pinus sylvestris* L., кривые высот, асимметрия, крутизна.

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

**Благодарности:** автор выражает благодарность рецензентам за вклад в экспертную оценку статьи.

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

**Для цитирования:** Петрин, Р. Д. Простые показатели асимметрии, использованные при исследовании естественных одновозрастных насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Болгарии / Р. Д. Петрин // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 41–55. – Библиогр.: с. 51–55 (35 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/4>.

**Поступила** 18.05.2023. **Пересмотрена** 03.11.2023. **Принята** 13.11.2023. **Опубликована онлайн** 30.11.2023.

### Introduction

An important problem with measuring the volumes of forest-stand trees and with the formation of assortments from these trees is the one with the shapes of the variation curves of the distribution of tree numbers according to thickness levels and, more exactly, where the maximum of these numbers is with respect to the average diameter ( $d_{av}$ ) – on the left or on the right, as the side on which the summed numbers of trees are more is of decisive importance. A variation curve with a right-hand-side asymmetry signifies, for a particular stand or an aggregate of stands, a larger amount of bigger-sized timber. A left-hand-side asym-

metry is available when numbers of thinner trees dominate, i.e. when the maximum of these numbers is situated on the left of  $d_{av}$ , or around it when the distribution curve passes at a greater height. It is just the opposite with the right-hand-side asymmetry: the distribution curve's maximum or passing at a greater height is on the right of  $d_{av}$ . And when the maximum is around the average diameter, the distribution curve, also called thickness-structure curve, is of a symmetric (or normal) type. The maximum with the symmetric type of distribution is around the average diameter ( $d_{av}$ ), and it is necessary to have in mind the established scientific fact (Tretyakov, 1927), that the average diameter divides

the total number of trees in even-aged dendrocoenoses into two unequal proportions in the following ratio: about 60% thinner and 40% thicker. This is why, for higher precision of the investigation, the asymmetry found with respect to the average diameter, as measured through forest-mensuration methods, has been preferred to the statistical asymmetry determined with respect to the maximum (i.e. moda) of the parabolic curve.

The availability of different types of thickness structure, or types of asymmetries of distribution, is a fact known since long ago as found for many tree species. Tretyakov (1927), based on data of his own and data taken from Weise, Kunze and others, carried out a detailed study of the regularities in the structure and variability of some dendrobiometric indicators found in even-aged, pure and uneven-aged stands, with mixed composition and complex management. He found out that the forest structure always had a constant nature regardless of spacing index, age, tree species, growth conditions and whether the stands were normal or complex, mixed ones. This gave him the reason to formulate the Law of Uniformity of Stand Structures.

S. Nedyalkov (1955) found out for high-stemmed beech stands a difference in the shapes of the variation curves of distribution depending on the thinnings carried out in the stands, as the total percentage of the number of trees of diameters close to the average one was by 3-4% larger for the stands where no thinnings had been carried out. Similar differences in the total percentage of trees thinner than the average diameter were found out for mixed beech-and-Scots-pine stands by Krustanov (1968) depending mainly on age. E. P. Dimitrov (1978) found out for mature beech stands the availability of three typical distributions: symmetric, or normal, right-hand-side asymmetric and left-hand-side asymmetric. E. T. Dimitrov (2003), while investigating different functions of tree-number distribution according to levels of thickness and height, found out the availability of three distributions typical of Scots pine, Norway spruce and silver fir: symmetric, or normal, right-hand-side asymmetric, or positive, and left-hand-side asymmetric, or negative\*. (\* In some of the investigations cited, it is talked «*about a statistical asymmetry of the very curve with respect to its maximum, not about an asymmetry with respect to the aver-*

*age diameter, i.e. with respect to a fixed point on the abscissa. Most often, a left-hand-side negative statistical asymmetry corresponds to the right-hand-side asymmetry with respect to the average diameter, and a right-hand-side positive statistical asymmetry corresponds to the left-hand-side asymmetry with respect to  $d_{av}$ »)*

R. Petrin, independently as well as in co-authorship, has also found out the availability of «*three different types of asymmetry with respect to  $d_{av}$ : left-hand-side, right-hand-side and symmetric, or normal, type*» for seed-tree common beech (2013, 2014), for spruce and fir (2015), for coppice dendrocoenoses of Hungarian oak, durmast and Turkey oak (2016), for Scots pine and Scots pine crops (2018), and for seed-tree dendrocoenoses of Hungarian oak, durmast and Turkey oak (2019).

In pieces of Western literature, the steepness of growth curves has been called rate of rate or trend of growth (Mario Trouillier et al., 2020). According to a similar logic in our investigation has the steepness of the height-structure curves been found out by means of the indices of steepness  $I_{st}$  (Petrin, 2021). Diego Rodriguez de Prado, Jose Riorfio et al. (2022) have investigated the height structures of pure and mixed coniferous and deciduous stands. They have found out that pure coniferous stands reach greater average heights than mixed ones, whereas with deciduous stands, on the contrary, mixed ones grow better in height.

Kyle W. Tomlinson et al. (2014) have found out that the growth rate of coniferous trees is higher than that of deciduous ones. Louisa Timinska-Chabanska et al. (2020) have found out for the main forest-forming (pioneer) forest tree species that the curves of the site-index (stand-quality-level) classes of the young and old stands divert to the greatest extent from the average positions of these. Facundo J. Odie, Cecilia Callas et al. (2022) have found out about Chilean cedar (*Austrocedrus chilensis*) that it grows better on moist and cool sites where there is more carbon in the soil and lower acidity.

### Purpose of Investigation

The objectives of the present work are:

1. To propose an asymmetry index for diametrical distributions in forestry, as well as the asymmetry rate related with him.

2. To find out the typical values of the index, e.g. in natural Scots pine stands.

3. To apply the index to study the relationship between the asymmetry of the diametrical distributions and the steepness of the height curves.

### Objects and Methods

A total of 110 sample plots in natural Scots pine stands aged from 25 to 130 years (72 as an average) with fulness around and over 0.7 were used for obtaining the data on thickness structure, and 27 – for the data on height structure. As usual, "forest stand structure by thickness" means the diametrical distribution of tree number, and "forest stand structure by height" – the height curve.

All curves we consider were standardized by conversion into **natural levels of thickness** (NLT), i.e. by dividing the diameters by the mean diameter of the forest stand,

$$x = \frac{d}{d_{\text{mean}}} = \text{NLT}. \quad (1)$$

NLT values were rounded to the nearest 0.1. The **central level of thickness** corresponds to the mean diameter  $d_{\text{mean}}$ . Thus, for the central level of thickness  $x = 1$ . NLT are usually said to range from 0.5 to 1.7. NLT are usually said to range from 0.5 to 1.7. The data often violate this rule. In our data the NLT ranged from 0.5 to 1.5, i.e. outside this range the registered tree numbers were 0 or maximum 3% of total sum.

We shall term **asymmetry coefficient** the quantity

$$C = \frac{1}{N} \left( \frac{N_1}{2} + \sum_{x < 1} N_x \right), \quad (2)$$

where

$N_x$  is the number of trees in the NLT  $x$ ;

$N = \sum N_x$  is the total number of trees in the stand;

$N_1$  is the stem number of the central NLT.

Apparently,  $C$  is simply the empiric probability that a randomly selected diameter  $d$  is smaller than the mean diameter,  $C = P[d \leq d_{\text{mean}}]$ . The  $N_1/2$  term reflects the fact that the central degree of thickness contains an equal number of diameters larger and smaller than  $d_{\text{mean}}$ .

The interval assumed for the forest-mensuration symmetric (normal) type of distribution is  $C$  from 0.57 up to 0.61 (Tyurin, 1938),  $C$  bigger than 0.61 corre-

sponds to a left-hand-side asymmetry, and  $C$  smaller than 0.57 – to a right-hand-side asymmetry.

We shall term **asymmetry index** the quantity

$$I = \frac{N}{\sum_{x \leq 1} N_x}. \quad (3)$$

As the Tyurin distribution has an  $I$ -value about 1,5, approximately normal distributions have  $I$  of about 1,5, lower  $I$  indicates left skew, higher – right skew.

Apparently,  $I$  is approximately reciprocal to  $C$ . It includes a simplification, since it replaces the sum  $N_1/2 + \sum_{x < 1} N_x$  with  $\sum_{x \leq 1} N_x$ . Thus

$$I \approx \frac{1}{C}, \quad I \leq \frac{1}{C}. \quad (4)$$

Finally, we shall term **asymmetry rate** the relative index

$$A = \frac{I}{I_{\text{normal}}}, \quad (5)$$

where  $I_{\text{normal}} \approx 1.5$  is the asymmetry index of the Tyurin distribution. Obviously, approximately normal distributions have  $A = 1$ , lower  $A$ -values indicate left skew, higher – right skew.

To assess asymmetry, the so called **zero natural indicator** (ZNI) has been used by many Bulgarian publications (Douhovnikov and Mihov, 1983; Petrin, 2019). ZNI is a method used with varying success for a variety of tasks. Its main idea is to model with a linear equation the deviation of the experimental curves from the theoretical ones. When applied to standardized diametrical distributions, the method models the experimental distribution  $N_x$  with the equation

$$N_x = [b + (1 - b)x] n_x, \quad (6)$$

where  $n_x$  is Tyurin's, or mean for the aggregate, distribution, distribution, and  $b$  is a coefficient established by regression (and called ZNI). Distributions close to that of Turin have  $ZNI=1$ . Lower ZNI-values indicate right skew, higher – left skew.

To facilitate research, Normal curves of the distribution  $q_{x_n}$ , i.e. the curves of the normal numbers were calculated, according to the formula:

$$q_x = N_x / N_m. \quad (7), \text{ where}$$

$N_x$  is the numbers of trees in the individual degrees of thickness  $x$ ,

$N_m$  - the value of  $N$  in the central degree of thickness **m**

The normal sum point's curves  $q_{x\_sum}$ , are calculated by means of the formula:

$$q_{x\_sum} = N_{x\_sum} / N_{m\_sum} \quad (8),$$



where  $N_{x\_sum}$  are the values of  $N_{sum}$  for the particular levels of thickness  $x$ ,

$N_{m\_sum}$  – the value of  $N_{x\_sum}$  for the central level of thickness  $m$  (1.0)

The index of asymmetry is the rightmost ( $\Omega$ ) value of the curve  $q_{x\_sum}$ , i.e.  $I = q_{\Omega\_sum}$ .

The structure in height (H) is in its turn characterised by *the steepness of the curve of heights*, which shows the increase in the growth in height with the increase in thickness; it is assessed by means of the *index of steepness* (Petrin, 2021). The indices of **steepness** with height structure H ( $I_{st}$ ) are relative numbers calculated by means of the formula:

$$I_{st} = \frac{H_{\Omega}}{H_1}, \quad (9)$$

where  $H_{\Omega}$  is the height of the trees in the high levels of thickness  $\Omega \geq 1.5$ , and  $H_1$  is the average height of the trees in the central level of thickness.

Obviously,  $H_1$  is the height of the average stem of the forest stand, the diameter of which is equal to  $d_{mean}$ .

The index of steepness is an analogue of increment percent of growth curves. The latter is widely used to study growth - of pure and mixed plantations, of conifers and broad-leaved trees, of tree species, etc. (Trouillier et al., 2020; Tomlinson et al. 2014, Seo et al, 2017).

### Results

#### 1. Relationships between the measures of skew

Figure 1 shows the relationship between the coefficient of asymmetry  $C$  (on the abscissa), and the parameters  $I$ ,  $A$  and  $ZNI$ . There is a close relationship between the asymmetry coefficient  $C$  and the parameters  $I$  and  $A$  ( $R^2=0.93$ , and  $0.94$ ). No high correlation is observed between  $C$  and  $ZNI$  (the small crosses with the dotted linear trend line in the graph).

Note, that the scatter of  $I$  is entirely due to the above mentioned simplification. As  $A$  is function of  $I$ , its scatter simply mirrors that of  $I$ .

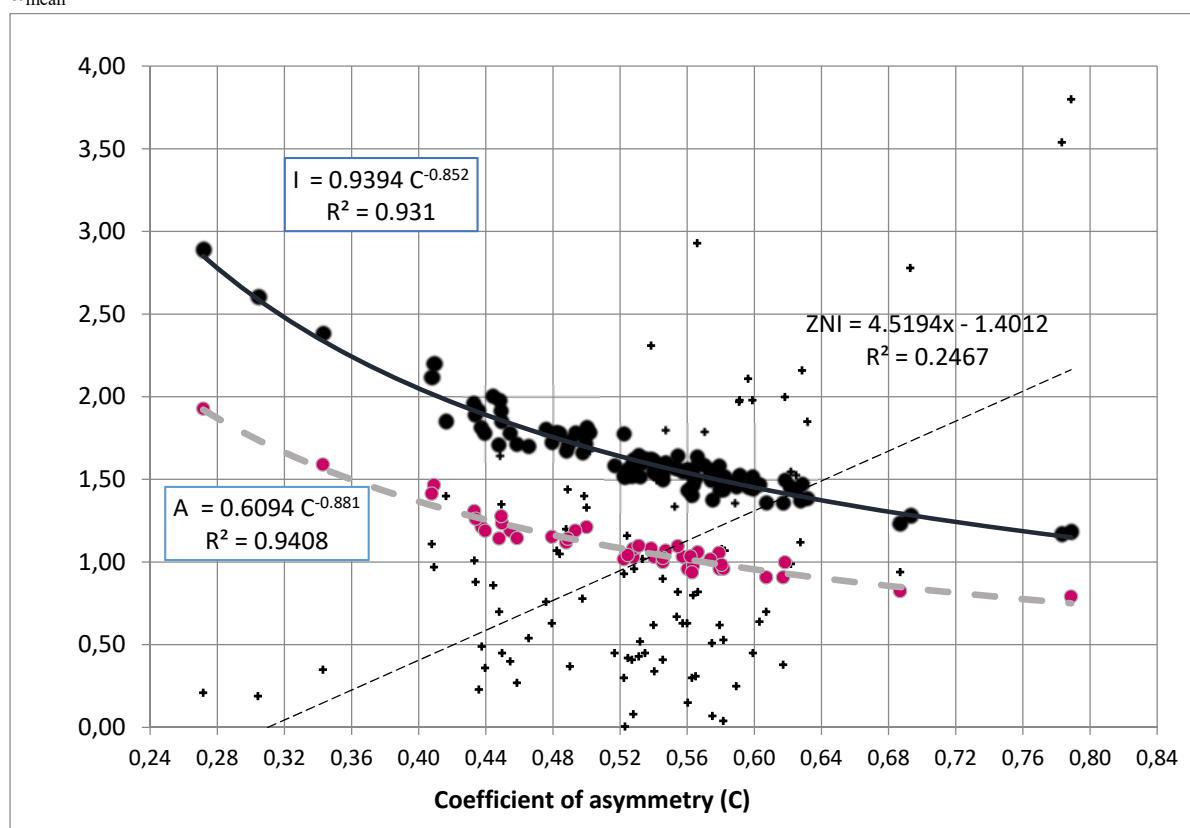


Figure 1. Relationships between the measures of asymmetry

Рисунок 1. Взаимосвязи между показателями асимметрии

Source: author's composition

Источник: собственная композиция автора

The figure shows that criteria  $C$ ,  $I$  and  $A$  give the same answer to the question whether the asymmetry is left or right: as defined, the asymmetry is left if  $C > 0.57$ ,  $I < 1.5$  resp.  $A < 1$ , and right otherwise. It can be seen that the trend lines of  $A$  and  $I$  reach their critical levels approximately at the point  $C=0.57$ . Contradictory decisions can only occur near this critical point due to the scatter of  $I$  and  $A$  points around their trendlines. Such cases will be few, because the scatter is weak. The ZNI trendline also reaches its critical level  $ZNI=1$  about the point  $C=0.57$ . However, the scatter of the ZNI points is so great that this trend line is rather random, due to a few outliers. From the size and the shape of the cloud of

ZNI points, it is seen that the criterion gives a different left/right and weak/strong judgments in half of the cases as compared with  $I$  and  $A$ .

### 2. Values of the parameters

Table 1 presents the distribution of the 101 sample plots according to types of asymmetry, the average values of the indicators  $C, I, A, ZNI$  and  $IS$  in the sample plots and values calculated from the Tyurin distribution in the rightmost column. The latter are given as a plausibility test.

Figure 2 compares the average diametrical distribution, obtained from the SPs, with the Tyurin distribution.

Table 1

Average values of the indicators in the SPs controlled with the Tyurin distribution

Таблица 1

Средние значения показателей на пробных площадях (контроль – распределение Тюрин)

Indicators	Sample plots data				Tyurin distribution
	Left skew	Right skew	No skew	<b>Total</b>	
Number of SPs	12	66	23	<b>101</b>	
Coefficient of Asymmetry ( $C$ )	0.66	0.5	0.58	<b>0.54</b>	<b>0.57</b>
Index of Asymmetry ( $I$ )	1.25	1.73	1.48	<b>1.63</b>	1.48
Asymmetry rate ( $A$ )	0.83	1.15	1.00	<b>1.09</b>	1.00
Zero Natural Indicator (ZNI)	0.83	1.89	1.15	<b>1.03</b>	1
Index of Steepness (IS)	1.09	1.05	1.08	<b>1.07</b>	1.10

Source: own calculations

Источник: собственные вычисления автора

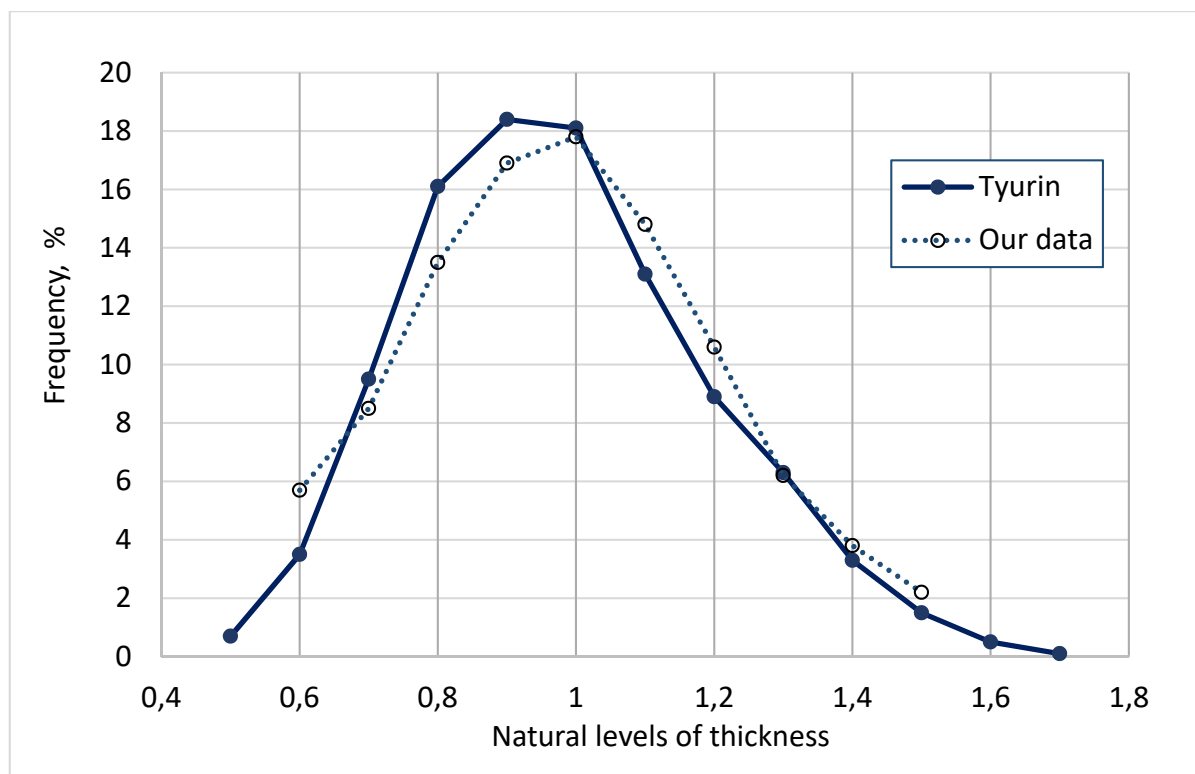


Figure 2. Average diameter distribution for our sample compared to the Tyurin distribution

Рисунок 2. Распределение среднего диаметра для исследуемой выборки по сравнению с распределением Тюрина

Source: author's composition

Источник: собственная композиция автора

One can see in Table 1 that sample plots of a right-hand-side asymmetry (66) dominate, next followed by plots of the normal type (23) and plots of a left-hand-side asymmetric distribution (12). The average coefficients of asymmetry, the indices, the **asymmetry rate**, and the weighted average value of the zero natural indicators for all the sample plots are: 0.54, 1.63, 1.09 и 1.03, respectively. A lower index of steepness ( $I=1.05$ ) – structure in height – corresponds to the right asymmetry ( $IS=1.15$ ) – structure in thickness. Our average curve of distribution is slight right asymmetric ( $C=0.54$ ,  $I=1.57$ ), Tyurin's Uniform Curve - Normal ( $C_{as}=0.57$ ,  $I_{as}=1.48$ ), which can be seen in fig. 1. The average index of steepness for the structure in height is 1.07, and this same index as calculated from The Uniform Average Curve of Height Structure (H) of Tyurin is 1.10, i.e. a less steep curve of

heights corresponds to a thickness-structure asymmetry more deflected to the right (in our investigation).

### 3. Average Absolute and Relative Curves (Curves of the Normal Numbers) for the Structures in Thickness and Height

Transforming the distribution curves into a relative ( $q_x$ ) type (Equation 7) makes it possible to decrease the interval within which the numerical values vary and to outline the asymmetry more clearly, and such relative curves (or the curves of the normal numbers) have been presented on Figure 3. It reveals that the **normal** curves stand at a distance from the abscissa close to the value of  $q_{N1.0}=1.0$ , and the curves of **the left-hand-side and right-hand-side asymmetries** jump up rather above 1 and place themselves on the left or on the right of the level of thickness 1.0.

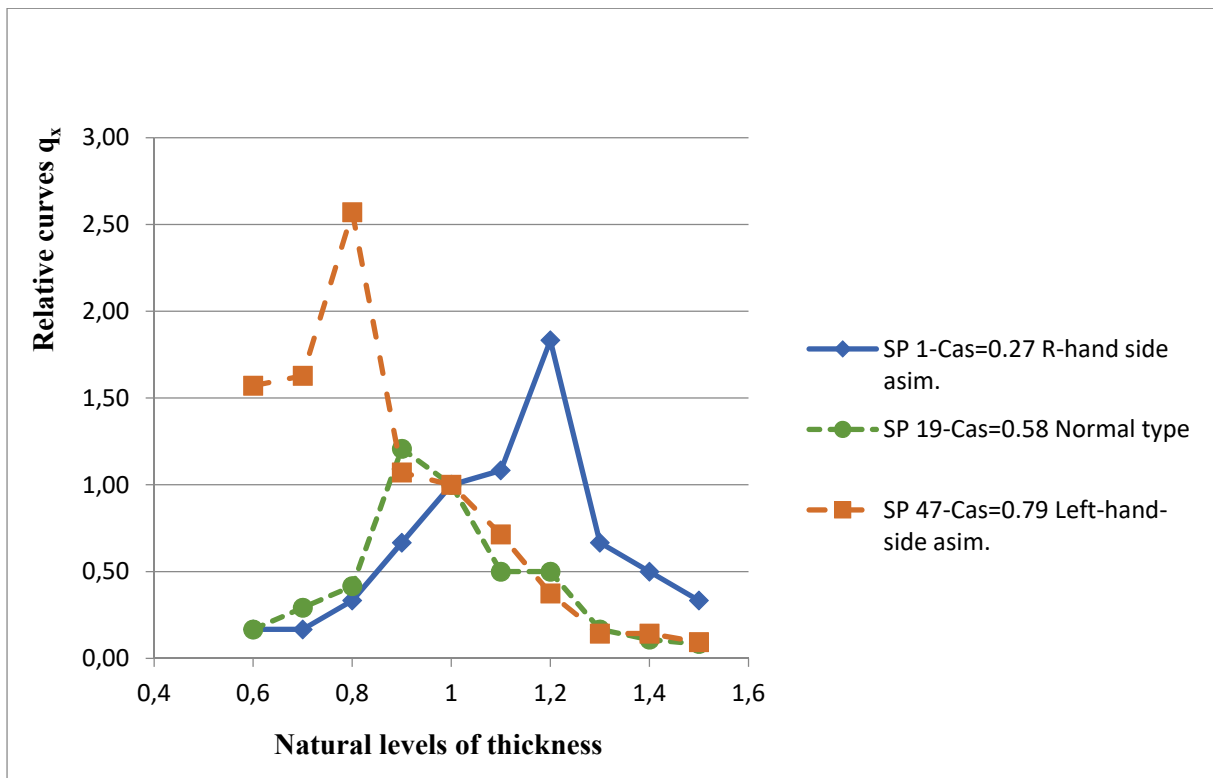


Figure 3. The three types of asymmetry presented by means of the relative curves  $q_x$

Рисунок 3. Три типа асимметрии представлены с помощью относительных кривых  $q_x$

The average and average relative curves of the structures in thickness  $d$  and height  $H$ , as being of a common, characterising importance for the different aggregates of forest stands, are important parametric curves and are presented in Table 2, as ac-

ording to our data so according to the generalised (Uniform) curves of Tyurin. One can also see the values of the indices obtained at the end of the thickness interval (1.4; 1.5).

Table 2

Average Parametric Curves of the Structures in Thickness and Height of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stands

Таблица 2

Средние параметрические кривые структур по толщине и высоте древостоев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)

Average Curves	Natural levels of thickness									
	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Our data [R. Petrin]										
Numbers of trees $N_x\%$	5.7	8.5	13.5	16.9	17.9	14.8	10.6	6.2	3.8	2.1
$q_x$ (normal numbers)	0.32	0.47	0.76	0.94	1.00	0.83	0.59	0.34	0.21	0.12
$N_{x\_sum}$ - Summed points' curve ( SPC) %	5.7	14.2	27.7	44.6	62.5	77.3	87.9	94.1	97.9	100
$q_{x\_sum}$ (normal numbers of SPC)	0.09	0.23	0.44	0.71	1.00	1.24	1.41	1.51	<b>1.57</b>	<b>1.60</b>

$q_{x_H}$ (normal numbers of height structure)	0.81	0.87	0.92	0.97	1.00	1.02	1.04	1.05	<b>1.07</b>	<b>1.12</b>
A.V. Tyurin's data										
$q_x$ (normal numbers of $d$ curve)	0.19	0.52	0.89	1.02	1.00	0.72	0.49	0.35	0.18	0.08
$q_{x\_sum}$ (normal numbers of SPC)	0.06	0.21	0.45	0.73	1.00	1.20	1.33	1.43	<b>1.48</b>	<b>1.50</b>
$q_{x_H}$ (normal numbers of height structure)	0.85	0.89	0.93	0.97	1.00	1.03	1.06	1.08	<b>1.10</b>	<b>1.12</b>

Source: own calculations

Источник: собственные вычисления авторов

4. Asymmetry type of diametrical distribution and height curve steepness

Figure 4 shows the index of steepness set in relation to the asymmetry index of the same sample plot. The scatter is not large, but the dependence appears weak. The trend line shows that the steepness of the height curves decrease with the increase of the asymmetry index, i.e with the increase right asymmetry. An opposite trend has been found in oak stands at an average age of 95: the steepness

of height curves increase with the increase in the right asymmetry (Petrin, R. 2021). A possible reason for this might be the age: the investigated Scots pine forests are younger, their average age being 72. With thickness levels lower than the average diameter  $d_{av}$ , the younger stands grow in height faster than the older ones, i.e. the right asymmetry in the distribution of tree numbers according to thickness does not lead to increase in the steepness of height curves.

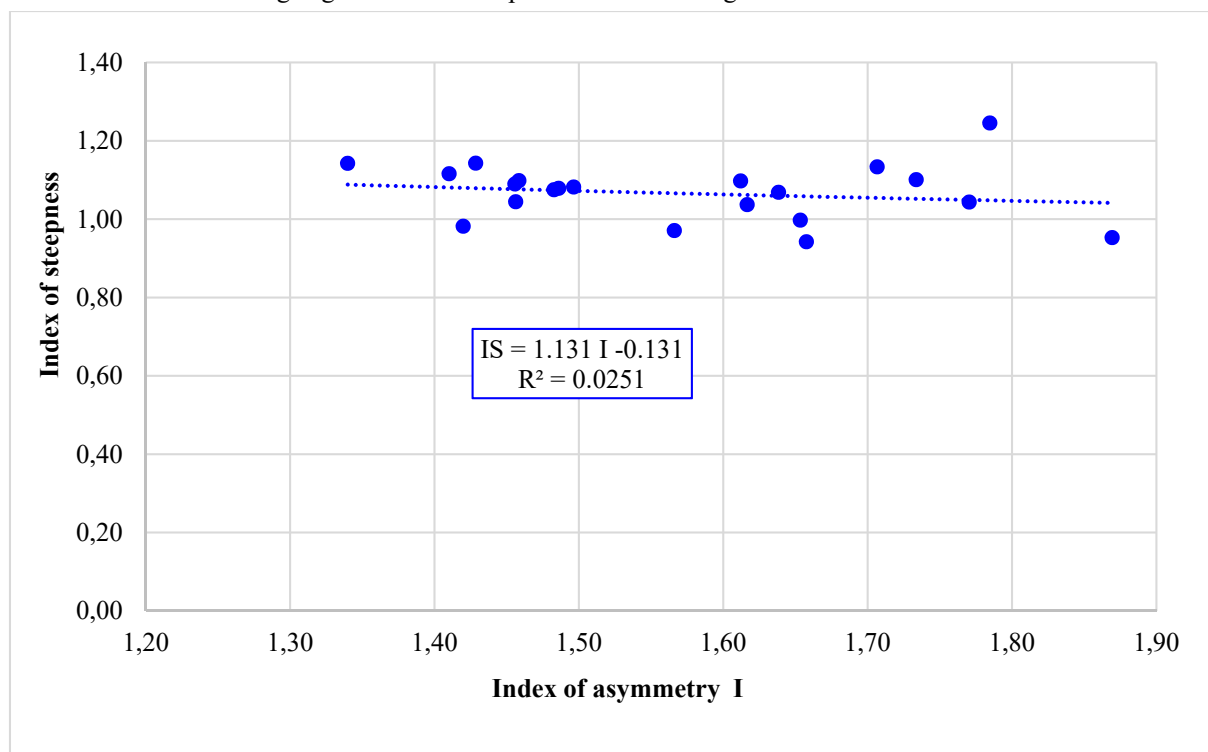


Figure 4. Dependence of the index of steepness (IS) on the index of asymmetry (I)  
Рисунок 4. Зависимость показателя крутизны (IS) от показателя асимметрии (I)

## Discussion

*Published research.* Worldwide, the shape of the diametrical distribution curves has been the subject of numerous studies. In Bulgaria, many studies focus on the relationships of asymmetric distributions with stand parameters (Nedyalkov, 1955) or cuts (Krastanov, 1968). Many case studies established empirically the skew for different tree species and forest types e.g. the author in a series of studies. The variety of skew is often limited to three asymmetry types: symmetric (or normal), right asymmetric and left asymmetric (E. P. Dimitrov, 1978). So did E. T. Dimitrov (2003), while fitting volumetric models for Scots pine, Norway spruce and silver fir. In the investigations cited, the statistical asymmetry coefficient  $\gamma = \mu_3/\sigma^3$ , or the ZNI were used. Because of different methodology, the results obtained are not directly comparable, incl. with our investigation, mentioned in the introduction. Recent research on diameter distribution has focused on fitting the Weibull equation from stand-level variables (Stankova and Rodriguez-Aranda, 2010; Stankova and Zlatanov, 2010).

**Definitions.** Formula (2) is derived as follows: In statistics, the approximate formula for estimating asymmetry is known  $\beta_3 = \sqrt{2\pi}(0.5 - C)$ , where  $\beta_3$  is the Charlier coefficient and  $C = P[d \leq \bar{d}]$  is the frequency of diameters thinner than the arithmetic mean diameter  $\bar{d}$  (Prodan, 1961, 1965). For  $\beta_3$  it is valid  $\beta_3 = -\gamma/6$  (Prodan, 1961). It follows a linear

relationship with constant coefficients between  $\gamma$  and  $C$ . This is sufficient to know that

$$C = P[d \leq \bar{d}] \quad (10)$$

is a measure of skewness. We prefer  $C$  to the quantity  $\beta_3$ , first, for simplicity, and second, because it is a strictly positive quantity, such as is preferred in forestry practice.

Finally, formula (10) differs from formula (2), which we use here, in that in even-age forest stands with a normal distribution, the coefficient of asymmetry  $C$  is about 60% (Turin, 1930), not 50%. Therefore, when studying the structure according to thickness formula (10) gives an insufficiently accurate result.

**Results.** The strong ZNI scattering in Fig. 1 is an expected result. The ZNI postulates a linear relationship between the standard and deviating curves, a condition that is often not met.

The weak slope of the trend line in Fig. 3 and the existence of case studies with a reverse slope speak rather that there is no correlation between I and IS. If so, these factors should be examined independently.

## Conclusion

The indices and indicators of asymmetry characterise the asymmetry in thickness structure much more precisely than the zero natural indicators and can be used for making generalised, comparative investigations as, for example, for finding out the relationship between the structures in thickness and height or the other kinds of structure of forest dendrocoenoses.

## Список литературы

1. Dimitrov, E. P. 1978. Regularities of the Thickness Structures of Mature Common Beech Stands. In: Gorskostopanska Naouka (Sylvicultural Science), Book 2, pp. 34-39, in Bulgarian. <https://naukazagorata.com/>
2. Dimitrov, E. T. 2003. Modelling the Structures, Volumes and Assortments of Middle-Aged and Maturing Dendrocoenoses of Scots Pine, Norway Spruce and Silver Fir. Simolini 94, Sofia, 13-23, in Bulgarian. [https://knigolubie.com/index.php?id\\_product=23863&controller=product](https://knigolubie.com/index.php?id_product=23863&controller=product)
3. Douhovnikov, Y., I. Mihov. 1983. Forest Mensuration. Zemizdat, Sofia, pp. 70-71, in Bulgarian. [https://knizhen-pazar.net/sold\\_products/books/1789980-gorska-taksatsiya](https://knizhen-pazar.net/sold_products/books/1789980-gorska-taksatsiya)
4. Facundo J. Oddi, Cecilia Casas, Matías G. Goldenberg, Juan P. Langlois, Jennifer B. Landesmann, Juan H. Gowda, Thomas Kitzberger, Lucas A. Garibaldi. Modeling potential site productivity for *Austrocedrus chilensis* trees in northern Patagonia (Argentina). Forest Ecology and Management. 524 (2022) 120525, P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120525>.
5. Krastanov, K. 1968. Regularities of the Thickness Structures of Mixed Stands of Common Beech and Scots Pine. Gorskostopanska Naouka, Book 5, pp. 25-41, in Bulgarian. <https://naukazagorata.com/>.

6. Kyle W. Tomlinson, Lourens Poorter, Frans Bongers, Fabian Borghetti, Loes Jacobs, Frank van Langevelde. Relative growth rate variation of evergreen and deciduous savanna tree species is driven by different traits. *Annals of Botany*, 2014, V. 114, Iss. 2, P. 315–324, <https://doi.org/10.1093/aob/mcu107>
7. Luiza Tyminska-Czabańska, Ewa Grabska 1,2 and Stanisław Orzeł 1 Site Index Models for Main Forest-Forming Tree Species in Poland Jarosław Socha 1, *Forests* 2020, 11, 301; doi:10.3390/f11030301
8. Markov, I. 2007. Naturalnite pokazateli na prof. Dukhovnikov, Nauka za gorata, kn. 4, in Bulgarian. <https://naukazagorata.com/?s=2007>
9. Mihov, I. 1984. Indices for Determining the Types of Growth of Forest Growing Stocks. *Gorsko Stopanstvo (Forestry) Magazine*, Book. 4, pp. 49-52, in Bulgarian. <https://www.gorabg-magazine.info/>
10. Mihov, I. 1986. Method of Determining the Types of Growth of Growing Stock and Its Application in Differentiated Site-Indexing of Natural Scots Pine Stands. Dissertation, pp. 49-52, in Bulgarian. <https://fri.bas.bg/wpcontent/uploads/15.%D0%A0%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD-%D0%9F%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BD.pdf>
11. Mihov, I. 2005. Forest Mensuration. Sofia, pp. 101-111, in Bulgarian. [https://knizhen-pazar.net/sold\\_products/books/777691-gorska-taksatsiya](https://knizhen-pazar.net/sold_products/books/777691-gorska-taksatsiya)
12. Mihov, I., R. Petrin. 1996. Indices for Determining the Types of Growth of Natural, Common-Beech Stands. Proceedings of The Second Balkan Conference on Investigation, Preservation and Utilisation of Forest Resources (3-5 June 1996, Sofia) Vol. I. pp. 50-53, in Bulgarian. <https://fri.bas.bg/wpcontent/uploads/15.%D0%A0%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD-%D0%9F%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BD.pdf>
13. Mihov, I., Y. Poryazov, M. Manev. 1996. Studies of the Regularities of the Structure of Mature Common Beech Stands in the Petrohan Teaching-and-Training Forest Enterprise. NTLTI, Vol. XXXVII, pp. 96-101, in Bulgarian. [https://ilib.ltu.bg/en/bool-simp.php?bool=\(16=%CC%E8%F5%EE%E2,%20%C8.\\$\)&page=1](https://ilib.ltu.bg/en/bool-simp.php?bool=(16=%CC%E8%F5%EE%E2,%20%C8.$)&page=1)
14. Nedyalkov, S. 1955. Thickness Structures of High-Forest Common-Beech Stands in Bulgaria. *Gorsko Stopanstvo (Forestry) Magazine*, Book7, pp. 305-318, in Bulgarian. <https://www.gorabg-magazine.info/>
15. Nedyalkov, S. 1959. On the Structures of Hungarian-Oak Coppice Stands in Bulgaria. Proceedings of the Forest Research Institute, Vol.5, pp. 89-147, in Bulgarian.
16. Petrin, R. 1988. Regularities of the Growth of Common-Beech Stands and Their Application in Forest-Management Planning. Dissertation, pp. 41-90, in Bulgarian. <https://fri.bas.bg/wp-content/uploads/15.%D0%A0%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD-%D0%9F%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BD.pdf>
17. Petrin, R. 2014. Investigations of the Thickness Structures of Scots–Pine Dendrocoenoses. 145 Years since the Establishment of the Bulgarian Academy of Sciences Digest. Research Published Works of the Forest Research Institute, pp. 81-89, in Bulgarian.
18. Petrin, R. 2015. Height structure of Scots pine stands. *Forestry ideas*, vol. 21, No 2 (50), p. 241-249.
19. Petrin, R. 2016. Thickness Structure of Frainetto Oak, Sessile Oak and Cerris Oak Dendrocoenoses. *Management & Sustainable Development*, Year 18, Vol. 57, pp. 91-95. [https://jmsd.bg/issues\\_bg.html](https://jmsd.bg/issues_bg.html)
20. Petrin, R. 2019. Thickness Structures of Seed-Tree Frainetto Oak, Sessile oak and Cerris Oak Dendrocoenoses. *Scientific Works of the Union of Scientists in Bulgaria - Plovdiv. Series C. Technics and Technologies*. Vol. XVII., ISSN 1311-9419, pp. 224-234.
21. Petrin, R. 2020. General Regularities of Height-Diameter Curves in Frainetto Oak, Sessile oak and Cerris Oak High Forests. *Silva Balkanica* 21(2), pp. 71-82.
22. Petrin, R. 2021. An Index Method and Its Application in Studying Forest Stands Structure and Growth. *Scientific Works of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, Series B. Natural Sciences and the Humanities*, Vol. XXI, pp. 113-125.
23. Petrin, R. and I. Markoff. 2015. Thickness Structures of Norway-Spruce and Silver-Fir Dendrocoenoses. *Management and Sustainable Development Magazine*, Year 17, Vol. 55, pp. 97-102, in Bulgarian. [https://jmsd.bg/issues\\_bg.html](https://jmsd.bg/issues_bg.html)
24. Petrin, R. I. Mihov. 2014. Investigations of the Thickness Structures of Natural Mature and Middle-Aged Common-Beech Dendrocoenoses, 145 Years since the Establishment of the Bulgarian Academy of Sciences Digest. *Published Research of the Forest Research Institute*, p. 25, in Bulgarian.

25. Petrin, R., I. Markoff, I. Mihov. 2013. Thickness and Height Structures of Natural Seed-Tree Common-Beech Dendrocoenoses in Bulgaria. Management and Sustainable Development Magazine, Year 15, Vol. 43, pp. 82-87, in Bulgarian. [https://jmsd.bg/issues\\_bg.html](https://jmsd.bg/issues_bg.html)
26. Petrin, R., I. Markoff, I. Mihov. 2014. Comparative Investigations of the Height Structures of Natural Mature and Middle-Aged Common-Beech Dendrocoenoses. Management and Sustainable Development Magazine, Year 16, Vol. 49, pp. 76-81, in Bulgarian. [https://jmsd.bg/issues\\_bg.html](https://jmsd.bg/issues_bg.html)
27. Petrin, R., I. Markoff. 2016. Height Structure of Oak Coppices (Frainetto, Sessile and Cerris oak). Forestry Ideas, Vol. 22, No. 2 (53), pp. 206-213. [https://forestry-ideas.info/issues/issues\\_Index.php?pageNum\\_rsIssue=1&totalRows\\_rsIssue=10&journalFilter=56](https://forestry-ideas.info/issues/issues_Index.php?pageNum_rsIssue=1&totalRows_rsIssue=10&journalFilter=56)
28. Petrin, R., K. Bogdanov. 2017. Comparative Investigations of the Form Factor for Different Tree Species. Uniform Average Form Factor. Management & Sustainable Development, 2, Year 19, Vol. 63, pp. 55-60. [https://jmsd.bg/issues\\_bg.html](https://jmsd.bg/issues_bg.html)
29. Petrin, R., I. Markoff. 2018. Thickness Structures of Natural and Artificial Scots Pine Dendrocoenoses. Scientific Researches of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, Series B. Natural Sciences and the Humanities, Vol. XVIII, ISSN 1311-9192, pp. 51-58. [https://usb-plovdiv.org/wp-content/uploads/2019/05/2018\\_estestveni\\_i\\_humanitarni\\_nauki\\_tom\\_XVIII.pdf](https://usb-plovdiv.org/wp-content/uploads/2019/05/2018_estestveni_i_humanitarni_nauki_tom_XVIII.pdf)
30. Petrin, R. 2021. Comparative analysis of the thickness and height structure of forest oak dendrocoenoses using new indicators in the study of asymmetry. Scientific works of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, series B. Natural and humanitarian sciences, item XXI, pp. 126-136. <https://usb-plovdiv.org/scientific-works-en/>
31. Prodan, M., 1961, Forstliche Biometrie, BLV Verlagsgesellschaft, München-Bonn-Wien, 432 pp. <https://www.google.com/search?q=Prodan>
32. Prodan, M., 1965. Holzmesslehre. J.D. Sauerländersverlag, Frankfurt am Main, 644 pp. <https://www.google.com/search?q=Prodan>
33. Seo Yeongwan, Daesung Lee & Jungkee Choi. Growth pattern analysis of major coniferous tree species in South Korea, Forest Science and Technology 2017:14(1):1-6 <https://www.researchgate.net/publication/321839385>
34. Stankova, T., T. Zlatanov. 2010. Modeling diameter distribution of Austrian black pine (*Pinus nigra* Arn.) plantations: a comparison of the Weibull frequency distribution function and percentile-based projection methods. Eur J Forest Res (2010) 129:1169-1179 <https://www.researchgate.net/publication/226406340>
35. Stankova, T., U. Diéguez-Aranda. 2010. Diameter distribution model for Scots pine plantations in Bulgaria. Forestry ideas, 2010, vol. 16, No 2 (40). 155-162. <https://www.researchgate.net/publication/233777100>
36. Tomlinson, Kyle W., Lourens Poorter, Frans Bongers, Fabian Borghetti, Loes Jacobs, Frank van Langevelde. Relative growth rate variation of evergreen and deciduous savanna tree species is driven by different traits. Annals of Botany, 2014, V. 114, Iss. 2, P. 315–324, <https://doi.org/10.1093/aob/mcu107>.
37. Tretyakov, N. V. 1927. Forest-stands structure uniformity law (Закон единства в строении насаждений). Novaya Derevnnya, Moscow-Leningrad, pp. 26-34, in Russian.
38. Trouillier Mario, Marieke van der Maaten-Theunissen, Tobias Scharnweber, Martin Wilmking. A Unifying Concept for Growth Trends of Trees and Forests -The "Potential Natural Forest". J. Frontiers in Forests and Global Change, Sep 2020, ISBN: 2624-893X. p. 2-12. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.581334>
39. Tyurin, A. V. 1938. Forest Mensuration (Таксация леса). Goslestehizdat (State-Owned Publishing House for I Sylvicultural and Technical Literature, Moscow, p. 376, in Russian. <https://violity.com/en/102382640-1945-taksaciya-lesa-tyurin-a-v>

### References

1. Dimitrov, E. P. 1978. Regularities of the Thickness Structures of Mature Common Beech Stands. In: Gorskostopanska Nauka (Sylvicultural Science), Book 2, pp. 34-39, in Bulgarian. <https://naukazagorata.com/>
2. Dimitrov, E. T. 2003. Modelling the Structures, Volumes and Assortments of Middle-Aged and Maturing Dendrocoenoses of Scots Pine, Norway Spruce and Silver Fir. Simolini 94, Sofia, 13–23, in Bulgarian. [https://knigolubie.com/index.php?id\\_product=23863&controller=product](https://knigolubie.com/index.php?id_product=23863&controller=product)
3. Douhovnikov, Y., I. Mihov. 1983. Forest Mensuration. Zemizdat, Sofia, pp. 70-71, in Bulgarian. [https://knizhen-pazar.net/sold\\_products/books/1789980-gorska-taksatsiya](https://knizhen-pazar.net/sold_products/books/1789980-gorska-taksatsiya)



4. Facundo J. Oddi, Cecilia Casas, Matías G. Goldenberg, Juan P. Langlois, Jennifer B. Landesmann, Juan H. Gowda, Thomas Kitzberger, Lucas A. Garibaldi. Modeling potential site productivity for *Austrocedrus chilensis* trees in northern Patagonia (Argentina). *Forest Ecology and Management*. 524 (2022) 120525, P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120525>.
5. Krastanov, K. 1968. Regularities of the Thickness Structures of Mixed Stands of Common Beech and Scots Pine. *Gorskostopanska Naouka*, Book 5, pp. 25-41, in Bulgarian. <https://naukazagorata.com/>
6. Kyle W. Tomlinson, Lourens Poorter, Frans Bongers, Fabian Borghetti, Loes Jacobs, Frank van Langevelde. Relative growth rate variation of evergreen and deciduous savanna tree species is driven by different traits. *Annals of Botany*, 2014, V. 114, Iss. 2, P. 315–324, <https://doi.org/10.1093/aob/mcu107>
7. Luiza Tyminska-Czabańska, Ewa Grabska 1,2 and Stanisław Orzeł 1 Site Index Models for Main Forest-Forming Tree Species in Poland Jarosław Socha 1, *Forests* 2020, 11, 301; doi:10.3390/f11030301
8. Markov, I. 2007. Naturalite pokazateli na prof. Dukhovnikov, *Nauka za gorata*, kn. 4, in Bulgarian. <https://naukazagorata.com/?s=2007>
9. Mihov, I. 1984. Indices for Determining the Types of Growth of Forest Growing Stocks. *Gorsko Stopanstvo (Forestry) Magazine*, Book. 4, pp. 49-52, in Bulgarian. <https://www.gorabg-magazine.info/>
10. Mihov, I. 1986. Method of Determining the Types of Growth of Growing Stock and Its Application in Differentiated Site-Indexing of Natural Scots Pine Stands. Dissertation, pp. 49-52, in Bulgarian. <https://fri.bas.bg/wpcontent/uploads/15.%D0%A0%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD-%D0%9F%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BD.pdf>
11. Mihov, I. 2005. Forest Mensuration. Sofia, pp. 101-111, in Bulgarian. [https://knizhen-pazar.net/sold\\_products/books/777691-gorska-taksatsiya](https://knizhen-pazar.net/sold_products/books/777691-gorska-taksatsiya)
12. Mihov, I., R. Petrin. 1996. Indices for Determining the Types of Growth of Natural, Common-Beech Stands. Proceedings of The Second Balkan Conference on Investigation, Preservation and Utilisation of Forest Resources (3-5 June 1996, Sofia) Vol. I. pp. 50-53, in Bulgarian. <https://fri.bas.bg/wpcontent/uploads/15.%D0%A0%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD-%D0%9F%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BD.pdf>
13. Mihov, I., Y. Poryazov, M. Manev. 1996. Studies of the Regularities of the Structure of Mature Common Beech Stands in the Petrohan Teaching-and-Training Forest Enterprise. NTLTI, Vol. XXXVII, pp. 96-101, in Bulgarian. [https://ilib.ltu.bg/en/bool-simp.php?bool=\(16=%CC%E8%F5%EE%E2,%20%C8.\\$\)&page=1](https://ilib.ltu.bg/en/bool-simp.php?bool=(16=%CC%E8%F5%EE%E2,%20%C8.$)&page=1)
14. Nedyalkov, S. 1955. Thickness Structures of High-Forest Common-Beech Stands in Bulgaria. *Gorsko Stopanstvo (Forestry) Magazine*, Book7, pp. 305-318, in Bulgarian. <https://www.gorabg-magazine.info/>
15. Nedyalkov, S. 1959. On the Structures of Hungarian-Oak Coppice Stands in Bulgaria. Proceedings of the Forest Research Institute, Vol.5, pp. 89-147, in Bulgarian.
16. Petrin, R. 1988. Regularities of the Growth of Common-Beech Stands and Their Application in Forest-Management Planning. Dissertation, pp. 41-90, in Bulgarian. <https://fri.bas.bg/wp-content/uploads/15.%D0%A0%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD-%D0%9F%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%BD.pdf>
17. Petrin, R. 2014. Investigations of the Thickness Structures of Scots–Pine Dendrocoenoses. 145 Years since the Establishment of the Bulgarian Academy of Sciences Digest. Research Published Works of the Forest Research Institute, pp. 81-89, in Bulgarian.
18. Petrin, R. 2015. Height structure of Scots pine stands. *Forestry ideas*, vol. 21, No 2 (50), p. 241-249.
19. Petrin, R. 2016. Thickness Structure of Frainetto Oak, Sessile Oak and Cerris Oak Dendrocoenoses. *Management & Sustainable Development*, Year 18, Vol. 57, pp. 91-95. [https://jmsd.bg/issues\\_bg.html](https://jmsd.bg/issues_bg.html)
20. Petrin, R. 2019. Thickness Structures of Seed-Tree Frainetto Oak, Sessile oak and Cerris Oak Dendrocoenoses. *Scientific Works of the Union of Scientists in Bulgaria - Plovdiv. Series C. Technics and Technologies*. Vol. XVII., ISSN 1311-9419, pp. 224-234.
21. Petrin, R. 2020. General Regularities of Height-Diameter Curves in Frainetto Oak, Sessile oak and Cerris Oak High Forests. *Silva Balkanica* 21(2), pp. 71-82.
22. Petrin, R. 2021. An Index Method and Its Application in Studying Forest Stands Structure and Growth. *Scientific Works of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, Series B. Natural Sciences and the Humanities*, Vol. XXI, pp. 113-125.

23. Petrin, R. and I. Markoff. 2015. Thickness Structures of Norway-Spruce and Silver-Fir Dendrocoenoses. Management and Sustainable Development Magazine, Year 17, Vol. 55, pp. 97-102, in Bulgarian. [https://jmsd.bg/issues\\_bg.html](https://jmsd.bg/issues_bg.html)
24. Petrin, R. I. Mihov. 2014. Investigations of the Thickness Structures of Natural Mature and Middle-Aged Common-Beech Dendrocoenoses, 145 Years since the Establishment of the Bulgarian Academy of Sciences Digest. Published Research of the Forest Research Institute, p. 25, in Bulgarian.
25. Petrin, R., I. Markoff, I. Mihov. 2013. Thickness and Height Structures of Natural Seed-Tree Common-Beech Dendrocoenoses in Bulgaria. Management and Sustainable Development Magazine, Year 15, Vol. 43, pp. 82-87, in Bulgarian. [https://jmsd.bg/issues\\_bg.html](https://jmsd.bg/issues_bg.html)
26. Petrin, R., I. Markoff, I. Mihov. 2014. Comparative Investigations of the Height Structures of Natural Mature and Middle-Aged Common-Beech Dendrocoenoses. Management and Sustainable Development Magazine, Year 16, Vol. 49, pp. 76-81, in Bulgarian. [https://jmsd.bg/issues\\_bg.html](https://jmsd.bg/issues_bg.html)
27. Petrin, R., I. Markoff. 2016. Height Structure of Oak Coppices (Frainetto, Sessile and Cerris oak). Forestry Ideas, Vol. 22, No 2 (53), pp. 206-213. [https://forestry-ideas.info/issues/issues\\_Index.php?pageNum\\_rsIssue=1&totalRows\\_rsIssue=10&journalFilter=56](https://forestry-ideas.info/issues/issues_Index.php?pageNum_rsIssue=1&totalRows_rsIssue=10&journalFilter=56)
28. Petrin, R., K. Bogdanov. 2017. Comparative Investigations of the Form Factor for Different Tree Species. Uniform Average Form Factor. Management & Sustainable Development, 2, Year 19, Vol. 63, pp. 55-60. [https://jmsd.bg/issues\\_bg.html](https://jmsd.bg/issues_bg.html)
29. Petrin, R., I. Markoff. 2018. Thickness Structures of Natural and Artificial Scots Pine Dendrocoenoses. Scientific Researches of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, Series B. Natural Sciences and the Humanities, Vol. XVIII, ISSN 1311-9192, pp. 51-58. [https://usb-plovdiv.org/wp-content/uploads/2019/05/2018\\_estestveni\\_i\\_humanitarni\\_nauki\\_tom\\_XVIII.pdf](https://usb-plovdiv.org/wp-content/uploads/2019/05/2018_estestveni_i_humanitarni_nauki_tom_XVIII.pdf)
30. Petrin, R. 2021. Comparative analysis of the thickness and height structure of forest oak dendrocoenoses using new indicators in the study of asymmetry. Scientific works of the Union of Scientists in Bulgaria-Plovdiv, series B. Natural and humanitarian sciences, item XXI, pp. 126-136. <https://usb-plovdiv.org/scientific-works-en/>
31. Prodan, M, 1961, Forstliche Biometrie, BLV Verlagsgesellschaft, München-Bonn-Wien, 432 pp. <https://www.google.com/search?q=Prodan>
32. Prodan, M, 1965. Holzmesslehre. J.D. Sauerländersverlag, Frankfurt am Main, 644 pp. <https://www.google.com/search?q=Prodan>
33. Seo Yeongwan, Daesung Lee & Jungkee Choi. Growth pattern analysis of major coniferous tree species in South Korea, Forest Science and Technology 2017:14(1):1-6 <https://www.researchgate.net/publication/321839385>
34. Stankova, T., T. Zlatanov. 2010. Modeling diameter distribution of Austrian black pine (*Pinus nigra* Arn.) plantations: a comparison of the Weibull frequency distribution function and percentile-based projection methods. Eur J Forest Res (2010) 129:1169-1179 <https://www.researchgate.net/publication/226406340>
35. Stankova, T., U. Diéguez-Aranda. 2010. Diameter distribution model for Scots pine plantations in Bulgaria. Forestry ideas, 2010, vol. 16, No 2 (40). 155-162. <https://www.researchgate.net/publication/233777100>
36. Tomlinson, Kyle W., Lourens Poorter, Frans Bongers, Fabian Borghetti, Loes Jacobs, Frank van Langevelde. Relative growth rate variation of evergreen and deciduous savanna tree species is driven by different traits. Annals of Botany, 2014, V. 114, Iss. 2, P. 315–324, <https://doi.org/10.1093/aob/mcu107>.
37. Tretyakov, N. V. 1927. Forest-stands structure uniformity law (Закон единства в строении насаждений). Novaya Derevnnya, Moscow-Leningrad, pp. 26-34, in Russian.
38. Trouillier Mario, Marieke van der Maaten-Theunissen, Tobias Scharnweber, Martin Wilmking. A Unifying Concept for Growth Trends of Trees and Forests -The "Potential Natural Forest". J. Frontiers in Forests and Global Change, Sep 2020, ISBN: 2624-893X. p. 2-12. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.581334>
39. Tyurin, A. V. 1938. Forest Mensuration (Таксация леса). Goslestehizdat (State-Owned Publishing House for I Sylvicultural and Technical Literature, Moscow, p. 376, in Russian. <https://violity.com/en/102382640-1945-taksaciya-lesa-tyurin-a-v>.

### Information about the author

✉ *Rumen D. Petrin* – Associate Professor in Forestry, PhD, Forest Research Institute in Bulgarian Academy of Sciences, 132, St. Kliment Ohridski Blvd., Sofia, 1756, Bulgaria. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5831-5983>, e-mail: [lesni4eja2014@gmail.com](mailto:lesni4eja2014@gmail.com)

### Сведения об авторе

*Румен Димитров Петрин* – кандидат наук, доцент, Научно-исследовательский институт леса Болгарской академии наук, бул. Климента Охридского, 132, г. София, 1756, Болгария. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5831-5983> e-mail: [lesni4eja2014@gmail.com](mailto:lesni4eja2014@gmail.com).

✉ – Для контактов/Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>

УДК 630\*581/\*584



## Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона

Александр В. Лебедев<sup>1,2</sup>✉, [alebedev@rgau-msha.ru](mailto:alebedev@rgau-msha.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия

<sup>2</sup>ФГБУ «Государственный природный заповедник «Кологривский лес» имени М.Г. Синицына», ул. Некрасова, 48, г. Кологрив, Костромская обл., 157440, Россия

В последние годы для сбора биометрических показателей деревьев разрабатывается специализированное программное обеспечение для смартфонов, в том числе с использованием встроенных датчиков LiDAR. Мобильные приложения для таксации деревьев и древостоев находятся еще только на начальном пути своего развития, поэтому требуется сопоставление получаемых с их использованием данных с данными измерений, полученными с применением традиционных методов. Для России технология определения таксационных показателей и картографирование деревьев с применением смартфона остается не апробированной. Поэтому целью исследования являлось изучение возможности использования смартфона (приложение Arboreal Forest) для определения таксационных показателей и картирования деревьев на примере старовозрастных аллеиных посадок. Исследование проводилось в старовозрастных аллеиных посадках липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) на территории бывшего Зоотехнического техникума, расположенного в пос. Екимцево Кологривского муниципального округа Костромской обл. Сбор данных проводился в июле 2023 года с применением 1) традиционного метода и 2) приложения Arboreal Forest. Точность полученных результатов соответствует требованиям к таксации, обозначенным в лесоустроительной инструкции. Для объекта исследования выявлено, что отклонение среднеквадратического диаметра, рассчитанного по данным Arboreal Forest (47,3 см), от данных измерений мерной вилкой (48,8 см) составило -3,1 % (-1,5 см), а суммы площадей поперечных сечений -6,18 % или -3,28 м<sup>2</sup>. Также по сравнению с традиционным методом Arboreal Forest имеет тенденцию к занижению диаметров стволов (особенно для крупномерных деревьев) и, как следствие, площадей поперечных сечений. Структура ряда распределения деревьев по ступеням толщины Arboreal Forest в целом близка ряду распределения, полученному традиционным способом. В перспективе приложения для смартфонов могут стать эффективной альтернативой традиционным методам проведения перечислительной таксации и инвентаризации зеленых насаждений.

**Ключевые слова:** *подеревная инвентаризация, липа мелколистная, Tilia cordata* Mill., *таксация, Arboreal Forest, iPhone LiDAR, смартфон*

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01016, <https://rscf.ru/project/23-76-01016/>.


**Благодарности:** автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

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

**Для цитирования:** Лебедев, А. В. Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона / А. В. Лебедев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 56–70. – Библиогр.: с. 65–70 (35 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>.

Поступила 31.08.2023. Пересмотрена 29.10.2023. Принята 15.11.2023. Опубликована онлайн 30.11.2023

## Tree inventory in urban areas using smartphone

Aleksandr V. Lebedev<sup>1,2</sup>✉, alebedev@rgau-msha.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow city, 127434, Russian Federation

<sup>2</sup>Kologrivsky Forest Nature Reserve, Nekrasova st., 48, Kologriv town, Kostroma region, 157440, Russian Federation

### Abstract

In recent years, specialized software for smartphones has been developed to collect biometric indicators of trees, including the use of built-in LiDAR sensors. Mobile applications for the inventory of trees and forest stands are still at the initial stage of their development; therefore, it is necessary to compare the data obtained with their use with the measurement data obtained using traditional methods. For Russia, the technology for determining tree and stand indicators and mapping trees using a smartphone remains untested. Therefore, the aim of the study was to study the possibility of using a smartphone (Arboreal Forest application) to determine tree indicators and map trees using the example of old-growth alley plantings. The study was carried out in old-growth alley plantings of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) on the territory of the former Zootechnical College, located in the Ekimtsevo village, Kologrivsky District, Kostroma Region. Data collection was conducted in July 2023 using 1) the traditional method and 2) the Arboreal Forest application. The accuracy of the results obtained corresponds to the requirements for inventory indicated in the forest inventory instructions. For the object of study, it was revealed that the deviation of the quadratic mean diameter calculated according to the Arboreal Forest data (47.3 cm) from the measurement data with a caliper (48.8 cm) was -3.1% (-1.5 cm), and basal areas -6.18 % or -3.28 m<sup>2</sup>. Also, compared to the traditional method, Arboreal Forest tends to underestimate trunk diameters (especially for large trees) and, as a result, basal areas. The structure of the tree distribution series by Arboreal Forest tree diameter distribution is generally close to the distribution series obtained by the traditional method. In the future, applications for smartphones can become an effective alternative to traditional methods of tree and stand inventory.

**Keywords:** tree inventory, *Tilia cordata* Mill., stand inventory, Arboreal Forest, iPhone LiDAR, smartphone

**Funding:** this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-76-01016, <https://rscf.ru/project/23-76-01016/>.

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

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

**For citation:** Lebedev A. V. (2023). Tree inventory in urban areas using smartphone. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 56-70 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>.

**Received** 31.08.2023. **Revised** 29.10.2023. **Accepted** 15.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

### Введение

Древесные зеленые насаждения относятся к важным составляющим элементам урбоэкосистем, выполняя широкий спектр функций: от снижения уровня загрязнений окружающей среды до повышения эстетичности антропогенных и природных

ландшафтов [1, 2, 3]. На объектах ландшафтной архитектуры особенно важно поддерживать в актуальном состоянии информацию о зеленых насаждениях с целью оперативного проведения мероприятий по уходу и восстановлению. В последние годы в России в качестве проблемы отмечается отсут-

ствии единых методик для инвентаризации зеленых насаждений, а также необходимость совершенствования существующих [2, 4, 5]. При этом получают распространение как в нашей стране, так и за рубежом методы инвентаризации, основанные на использовании ГИС-технологий, бесконтактных измерений [6, 7, 8].

В качестве альтернативы традиционным методам инвентаризации древесной растительности все более популярным становится использование наземного лазерного сканирования (LiDAR) [9, 10, 11]. Биометрические характеристики деревьев могут быть точно и автоматически оценены на основе трехмерных облаков точек, полученных с помощью наземного лазерного сканера [12, 13]. Вместе с тем высокая стоимость устройств LiDAR, их тяжесть и необходимость использования специализированного программного обеспечения ограничивает их массовое применение [14, 15]. В 2020 году Apple выпустила первые устройства iPad Pro 2020 и iPhone 12 Pro, оснащенные датчиками LiDAR, в то время как Android-смартфоны оснащались сенсорами глубины (ToF) [16]. Возможности LiDAR и ToF в дальнейшем были проверены экспериментально для различных объектов и условий.

Технология Google Tango на устройстве Lenovo Phab 2 Pro была рассмотрена применительно к измерению таксационных диаметров стволов деревьев. В Словакии на трех круговых тестовых участках с радиусом 12,62 м значение квадратного корня из среднеквадратической ошибки (*RMSE*) диаметров составило менее 2 см [17], а на участке со 121 деревом в южной части Финляндии – 0,73 см [18]. Возможности сенсора LiDAR iPad Pro проверялись для целей крупномасштабного 3-D картографирования архитектурных объектов [19]. На основании значений ошибок было выявлено качество, приемлемое для работы в масштабе 1:200. Оценка точности и возможностей LiDAR сканера iPad Pro 2020 и iPhone Pro 12 проводилась для крупных природных объектов на примере скалы в Дании (длина 130 м, средняя высота 10 м) [20]. Авторами была получена реалистичная 3-D модель с точностью до 10 см. В то же время сравнение точности измерений промышленных LiDAR сенсоров

со встроенными в смартфоны и планшеты показывает преимущество первых из них [21].

В последние годы для сбора биометрических показателей деревьев разрабатывается специализированное программное обеспечение для смартфонов, в том числе с использованием встроенных датчиков LiDAR [22, 23]. Преимуществами использования технологии инвентаризации отдельных деревьев и древостоев с использованием смартфона являются портативность, простота использования, а также отсутствие необходимости в глубоких знаниях пользователя в области лесной таксации [24]. К наиболее распространенным приложениям относятся: Trestima, Katam, ForestScanner и Arboreal Forest.

Приложение Trestima разработано в Финляндии и работает на базе операционной системы Android. Для таксации применяются изображения, которые были сделаны на разных локациях лесного участка. Все изображения обрабатываются в облаке Trestima, где по ним рассчитываются такие показатели как диаметры и высоты деревьев, площади поперечных сечений стволов, количество деревьев на 1 га, породный состав, распределение диаметров стволов по ступеням толщины и др. Результаты представляются пользователю в виде отчетов в формате Microsoft Office Excel или XML, которые содержат также сведения о стандартной ошибке и 95% доверительный интервал [24, 25].

Приложение Katam разработано в Швеции и работает на базе операционной системы Android. Пользователь получает информацию о таксационных характеристиках деревьев в результате анализа коротких видеороликов, снятых в лесу. Кроме того, приложение может анализировать изображения и видео, полученные с помощью беспилотного летательного аппарата, для определения высот деревьев [24].

Приложение ForestScanner разработано в Японии. Работает на устройствах Apple iPhone и iPad, оснащенных сенсором LiDAR. ForestScanner позволяет проводить измерения диаметров деревьев и оценивать их пространственное положение. В результате пользователь получает трехмерную модель нижних частей стволов деревьев, на которой отмечены таксационные диаметры [26].

Приложение Arboreal Forest разработано в Швеции. Так же, как и ForestScanner, работает только на устройствах Apple iPhone и iPad, оснащенных сенсором LiDAR. Пользователь может проводить измерения диаметров деревьев на круглых пробных площадях, линейных трансектах, а также пробных площадях произвольного размера. Кроме того, за счет применения встроенного LiDAR и геометрических методов имеется возможность автоматического измерения высот деревьев. После сбора данных приложение обрабатывает их и генерирует отчет с подробной таксационной характеристикой: средние диаметры и высоты, сумма площадей сечений, запас, депонирование углерода. Исходные данные (древесная порода, горизонтальные и вертикальные координаты, диаметр ствола и др.) сохраняются в формате JSON [24].

Использование приложений для смартфонов в целях получения биометрических характеристик деревьев может стать революционным решением в лесной таксации. А. Sandim et al. [24] на основании анализа работы приложений Trestima, Katam и Arboreal Forest отмечают, что точность получаемых данных зависит от характеристик рельефа, породного состава и возраста насаждений, их густоты. В ряде исследований указывается [24, 27, 28], что Arboreal Forest имеет хорошую точность определения таксационных показателей, не уступающую традиционным методам, хотя имеет тенденцию к занижению диаметров крупномерных деревьев.

Технология применения мобильных приложений для таксации деревьев и древостоев находится еще только на начальном пути своего развития, поэтому требуется сопоставление получаемых с их использованием данных с данными измерений, полученными с применением традиционных методов, для выявления возможных пределов ошибок. Для России технология определения таксационных показателей и картирования деревьев с применением смартфона остается не апробированной, а с учетом простоты использования и точности получаемых результатов стоит отдать предпочтение Arboreal Forest, которое разрабатывалось для лесов boreального пояса. Целью исследования являлось изучение возможности использования приложения для смартфона Arboreal Forest для определения такса-

ционных показателей и картирования деревьев на примере старовозрастных аллеиных посадок.

### Материалы и методы

*Место исследования.* Исследование проводилось на территории бывшего Зоотехнического техникума, расположенного в пос. Екимцево Кологривского муниципального округа Костромской обл. (N58.827922, E44.258515, WGS 84). Объект входит в перечень объектов культурного наследия регионального значения Костромской области. В 1890-1900 годы от главного учебного корпуса Низшего сельскохозяйственно-технического училища имени Ф.В. Чижова в направлении с запада на восток была заложена тройная аллея из липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), ставшая в дальнейшем символом учебного заведения (рис. 1). До закрытия техникума в 1987 году за аллеиными посадками осуществлялся постоянный уход, проводилась замена погибших деревьев. В настоящее время липовые аллеи сформированы перестойными деревьями, большинство из которых находится в неудовлетворительном состоянии, и пней порослью от погибших деревьев. Общая площадь составила 0,39 га.



Рисунок 2. Объект исследования (липовые аллеи бывшего Зоотехнического техникума)

Figure 2. Object of the study (linden alleys of the former Zootechnical College)

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition

*Сбор данных.* Сбор данных проводился в июле 2023 года с применением 1) традиционного метода и 2) приложения Arboreal Forest. При ис-



пользовании первого метода каждому дереву присваивался номер и измерялся диаметр ствола на высоте 1,3 м в двух взаимно перпендикулярных направлениях мерной вилкой Haglof Mantax Blue (с точностью до 0,1 см).

Процесс сбора данных с использованием Arboreal Forest (версия 3.24) производился в соответствии с инструкциями разработчика в режиме пробной площади произвольной конфигурации. Использованное мобильное устройство – Apple iPhone Pro 14. Максимальная дальность действия LiDAR составляет 5 м, а потенциальная плотность точек лазерного сканирования составляет 7225 на 1 м<sup>2</sup> при расстоянии 25 см и 150 точек при расстоянии 250 см [29].

Первым этапом являлось обозначение точки начала отсчета на местности, относительно которой определялось расстояние до деревьев. Для получения данных о диаметрах стволов необходимо подойти к каждому дереву и провести измерение приложением путем наведения камеры смартфона на дерево (на уровне высоты 1,3 м от поверхности почвы) с расстояния 0,3-1,0 м, которое зависит от размеров ствола (с увеличением толщины увеличивается расстояние съемки). Приложение с LiDAR сенсора получает облако точек, выполняется его сегментация с автоматическим распознаванием контура ствола и фиксацией значения диаметра измеряемого дерева (с точностью до 1 мм). Порода дерева вводится в ручном режиме (рис. 2). Координаты деревьев (горизонтальные и вертикальная) определялись автоматически по данным, получаемым со встроенного гироскопа, датчика LiDAR и системы спутниковой навигации. После завершения всех измерений полученные данные сохраняются в JSON файле и при наличии доступа к сети передачи данных импортируются в облачное хранилище.

*Обработка данных.* Данные из полевого журнала и отчета Arboreal Forest (измерения 283 деревьев) были организованы в таблицы Microsoft Office Excel, средствами которого проводился статистический анализ. При анализе данных значения диаметров и площадей поперечных сечений, полученных по результатам измерений Arboreal Forest,

сравнивались с результатами традиционного метода.

Для оценки сходства и различий между полученными двумя методами значениями таксационных показателей использовались различные метрики качества, выполнялся графический анализ и тестировались статистические гипотезы (о равенстве средних, о соответствии рядов распределения). Анализировались как значения диаметров и площадей поперечных сечений деревьев, так и распределения по ступеням толщины с градацией 4 см.



Рисунок 2. Интерфейс приложения Arboreal Forest в режиме измерения диаметров деревьев  
Figure 2. Arboreal Forest application interface in tree diameter measurement mode

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition



Для оценки соответствия рассчитывались такие метрики, как коэффициент детерминации ( $R^2$ ), квадратный корень из среднеквадратической ошибки (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), смещение (Bias):

$$R^2 = \frac{\sum (d_i - \bar{d}_i)^2}{\sum (d_i^{ref} - \bar{d}_i)^2},$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (d_i - d_i^{ref})^2}{n}},$$

$$MAE = \frac{\sum |d_i - d_i^{ref}|}{n},$$

$$Bias = \sum \frac{d_i - d_i^{ref}}{n},$$

где  $d_i$  – диаметр, измеренный Arboreal Forest, см;  $d_i^{ref}$  – диаметр, измеренный мерной вилкой, см;  $\bar{d}_i$  – среднее значение диаметров, измеренных Arboreal Forest, см;  $n$  – количество измерений.

Для сравнения средних значений по выборкам применялся парный t-критерий Стьюдента. Сравнение рядов распределения выполнялось по

критерию Хи-квадрат Пирсона. Все статистические выводы сделаны при  $p < 0,05$ . Обработка числовых данных со статистическим анализом проводилась в Microsoft Office Excel 16.78, графических – в AutoCAD 2023 и Adobe Photoshop 2022 с учетом требований к составлению инвентаризационных планов.

## Результаты и обсуждение

Результаты графического анализа представлены на рис. 3 и 4. Наблюдается высокое соответствие между диаметрами и площадями поперечных сечений, полученных в результате измерений, проведенных мерной вилкой и Arboreal Forest (рис. 2). На графиках рассеивания наложены прямые линии зависимости значений, измеренных Arboreal Forest, от полученных с помощью мерной вилки. Высокие значения коэффициентов детерминации (для диаметров  $R^2 = 0,99$  и для площадей поперечных сечений  $R^2 = 0,98$ ) указывают на согласованность значений в двух рассматриваемых выборках. Различия в средних значениях диаметров стволов ( $t = 0,67$ ;  $p = 0,50$ ) и площадей поперечных сечений ( $t = 0,87$ ;  $p = 0,39$ ), полученных двумя разными методами, являются статистически незначимыми.

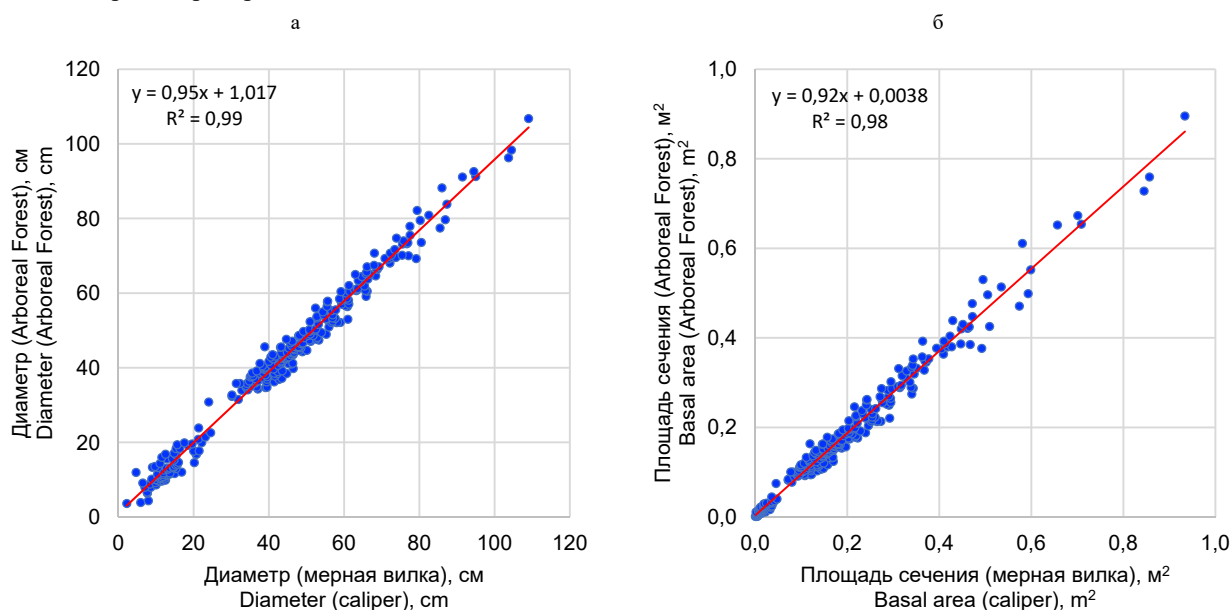


Рисунок 3. Соответствие между таксационными показателями по измерениям мерной вилкой и Arboreal Forest: а) диаметр на высоте груди, б) площадь поперечного сечения на высоте груди

Figure 3. Correspondence between tree indicators measured with a caliper and Arboreal Forest: a) diameter at breast height, b) basal area at breast height

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition

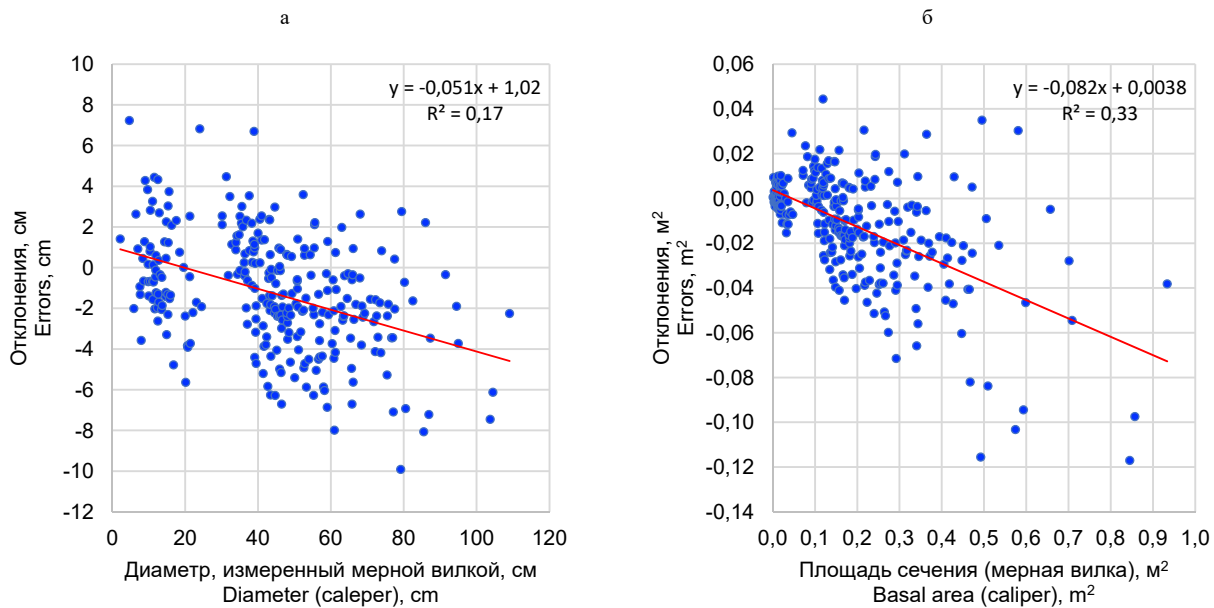


Рисунок 4. Отклонения таксационных показателей, определенных Arboreal Forest, от измеренных мерной вилкой: а) диаметр на высоте груди, б) площадь поперечного сечения на высоте груди  
 Figure 4. Deviations of tree indicators determined by Arboreal Forest from those measured with a caliper: а) diameter at breast height, б) basal area at breast height

Источник: собственная композиция автора  
 Source: author's composition

Таким образом, Arboreal Forest обеспечивает измерение таксационных показателей с высокой точностью, а отклонения от данных мерной вилки являются незначительными. Метрика RMSE для диаметров составила 3,03 см, для площадей поперечных сечений 0,026 м<sup>2</sup>; MAE для диаметров составила 2,41 см, для площадей поперечных сечений 0,018 м<sup>2</sup>.

По сравнению с традиционным методом Arboreal Forest имеет тенденцию к занижению диаметров и, как следствие, площадей сечений, особенно для крупномерных деревьев (рис. 3), на что указывают отрицательные коэффициенты угловых коэффициентов линейных трендов. Но в целом эта зависимость является слабвыраженной: для диаметров коэффициент детерминации ( $R^2$ ) составил 0,17 и для площадей поперечных сечений 0,32. На недооценку диаметров и площадей поперечных сечений приложением Arboreal Forest также указывает метрика Bias, которая для диаметров равна 1,22 см, а для площадей поперечных сечений - 0,012 м<sup>2</sup>.

Отклонение среднеквадратического диаметра, рассчитанного по данным Arboreal Forest

(47,3 см), от данных измерений мерной вилкой (48,8 см) составило -3,1 % (-1,5 см), что соответствует требованиям к точности таксации, предъявляемых лесоустроительной инструкцией (для глазомерно-измерительного метода случайная ошибка  $\pm 10\%$ ). Сумму площадей поперечных сечений деревьев Arboreal Forest занизил на 6,18 %, или 3,28 м<sup>2</sup>.

Структура ряда распределения деревьев по ступеням толщины Arboreal Forest в целом близка ряду распределения, полученному традиционным способом (рис. 5). Значение статистики Хи-квадрат составило 21,29 при  $p = 0,36$ , следовательно, различия в рассматриваемых рядах распределения статистически незначимы. Для деревьев липы в исследуемых аллеях характерен бимодальный ряд распределения с вершинами в ступенях толщины 12 и 44 см. Левая часть ряда распределения с размахом варьирования диаметров от 2 до 26 см характеризует порослевые деревья, выросшие в результате гибели старовозрастных в последние 35 лет. Вторая часть ряда распределения с размахом варьирования диаметров от 30 до 110 см характери-

зуют высаженные в аллеях деревья в период до 1987 года.

Arboreal Forest незначительно переоценивает количество деревьев в ступенях толщины, близких к центральным. Например, для ступени толщины 12 см число деревьев по данным традиционного метода составило 26, а по данным Arboreal Forest –

29. Для ступени толщины 44 см число деревьев по данным традиционного метода составило 31, а по данным Arboreal Forest – 35. В правой части ряда распределения, характеризующего наиболее толстые деревья, Arboreal Forest имеет тенденцию незначительного занижения количества деревьев.

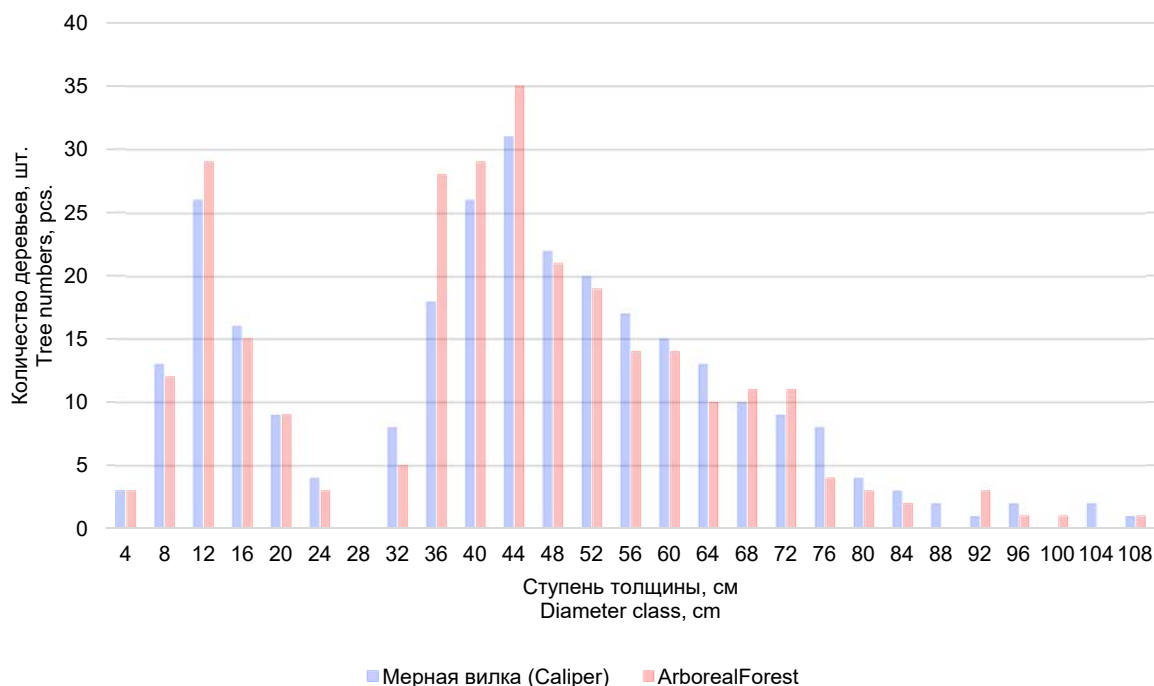


Рисунок 5. Распределения деревьев по ступеням толщины по результатам измерений мерной вилкой и Arboreal Forest

Figure 5. Trees diameter distributions by depth levels according to the results of measurements with a caliper and Arboreal Forest

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

На завершающем этапе по горизонтальным координатам стволов, выгруженным из отчета Arboreal Forest, был составлен опорный план пространственного расположения деревьев липы в аллеиных посадках (рис. 6). Аллея разделена на четыре зоны, отделенных друг от друга и отличающихся числом деревьев в ряду: 1) 9 деревьев (у главного учебного корпуса), 2) 11 деревьев, 3) 17 деревьев, 4) 27 деревьев (у парка). Расстояние между деревьями в ряду составило 3,0 м, между центральными рядами – 12,0 м и между двумя крайними рядами – 3,5 м. В регулярных садово-парковых насаждениях приложение позволяет с хорошей точностью определять шаг посадки между деревь-

ями: коэффициент вариации расстояния между соседними деревьями в ряду в каждой из четырех зон аллеи, а также между крайними рядами не превышает 5 %. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности использования Arboreal Forest при составлении планов подеревной инвентаризации зеленых насаждений населенных пунктов, а также при создании историко-опорных планов объектов озеленения, имеющих историческую и культурную ценность.

Последним критерием, по которому проводилось сопоставление традиционной методики и Arboreal Forest, являлось время, затраченное на проведение инвентаризационных работ одним че-

ловеком. На подеревную инвентаризацию, проведенную Arboreal Forest, было затрачено 75 минут, а традиционным способом – 148 минут. Использо-

вание приложения для смартфона позволило выполнить работы быстрее в два раза с незначительным снижением точности полученных результатов.

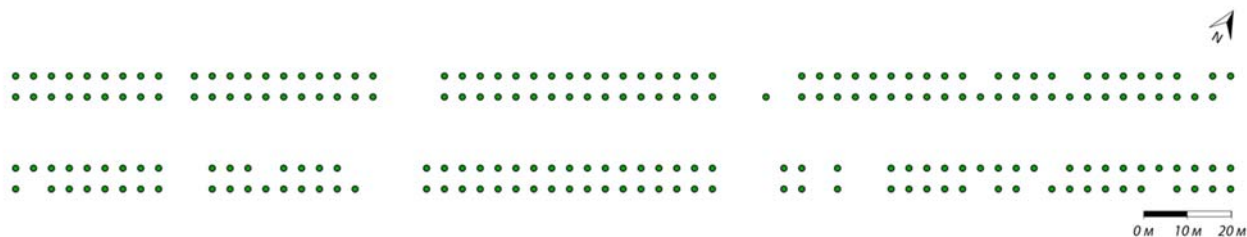


Рисунок 6. Опорный план пространственного расположения деревьев в аллейных посадках

Figure 6. Basic plan for the spatial arrangement of trees in alley

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Первый опыт использования в России приложения для смартфона Arboreal Forest показал высокую точность получаемых таксационных показателей деревьев, и подтвердил возможность в два раза быстрее собирать данные полевых измерений перечислительным методом по сравнению с традиционной методикой. По сравнению с основными приложениями-конкурентами, использующими для измерений сенсор LiDAR смартфона, стоит отдать предпочтение Arboreal Forest. При этом стоимость смартфона с приложением будет в 2-3 раза ниже, чем приобретение современной электронной мерной вилки.

Кроме того, были выявлены недостатки использования Arboreal Forest в условиях России. 1) Приложение является платным (месячная подписка 2050 руб., недельная – 649 руб.), а в настоящее время имеются значительные ограничения на совершение покупок в AppStore российскими пользователями. 2) Для условий России представлен ограниченный перечень видов деревьев (сосна обыкновенная, ель обыкновенная, береза повислая, осина, ольха серая, береза пушистая, ольха черная, липа мелколистная), который не охватывает всего многообразия породного состава лесов страны. 3) При количестве измеряемых деревьев более 200 может наблюдаться аварийная остановка приложения (для используемой в исследовании версии). 4) Геопривязанные данные о таксационных показателях обследованных участков хранятся на серверах, расположенных за рубежом, а в условиях санкци-

онных ограничений они могут стать недоступными для пользователей из России. 5) Заложенные в приложение лесотаксационные нормативы не являются адаптированными к многообразным лесорастительным условиям нашей страны.

В России существует высокая потребность в актуальной информации о количественных и качественных характеристиках насаждений на землях лесного фонда и объектах озеленения, что требует разработки новых методов таксации для повышения скорости сбора, обработки и получения итоговых данных [30]. Создание российского приложения для таксации с использованием аппаратных и программных возможностей современных смартфонов и планшетов возможно при наличии соответствующего запроса со стороны бизнес-структур, профильных НИИ и ВУЗов, органов исполнительной власти в области лесного хозяйства. К потенциальным потребителям такого продукта относятся лесопользователи, сотрудники организаций, осуществляющих работы по таксации лесов и инвентаризации зеленых насаждений, ландшафтные архитекторы, научные работники.

При разработке отечественного приложения, аналогичного по набору базовых функций Arboreal Forest, необходимо устранить выявленных выше недостатков. Например, использование методов глубокого обучения позволяет автоматизировать процесс определения древесных пород по коре. Современные алгоритмы показывают точность до 90 % [31, 32]. Также в приложение должны быть

заложены региональные нормативы для вычисления объемов стволов, запасов и биомассы древостоев, выхода сортиментов, так как в разных почвенно-климатических условиях взаимосвязи между отдельными таксационными показателями проявляются по-своему [33].

Использование сенсора LiDAR в смартфонах и планшетах показывает хорошие результаты при решении многих задач [19, 20, 21, 34, 35], но так как подобные Arboreal Forest приложения находятся на начальном этапе своего развития, то требуется дальнейшая проверка получаемых результатов в лесах России разных лесорастительных зон и отличающихся происхождением, возрастом, густотой, типом леса и др. В перспективе этот метод может стать эффективной альтернативой традиционным методам проведения перечислительной таксации и инвентаризации зеленых насаждений.

### Заключение

Впервые в России апробирована технология таксации и картирования деревьев с использованием смартфона, оснащенного сенсором LiDAR, на примере шведского приложения Arboreal Forest. Точность полученных результатов соответствует требованиям к таксации, обозначенным в лесоустроительной инструкции. Весь комплекс работ может быть выполнен одним человеком при временных затратах на проведение измерений в два раза меньше, чем по традиционной методике, и с

оперативным получением результатов непосредственно в полевых условиях в электронном формате. Для объекта исследования выявлено, что отклонение среднеквадратического диаметра, рассчитанного по данным Arboreal Forest (47,3 см), от данных измерений мерной вилкой (48,8 см) составило -3,1 % (-1,5 см), а суммы площадей поперечных сечений -6,18 % или -3,28 м<sup>2</sup>. Также по сравнению с традиционным методом Arboreal Forest имеет тенденцию к занижению диаметров стволов (особенно для крупномерных деревьев) и, как следствие, площадей поперечных сечений. Структура ряда распределения деревьев по ступеням толщины Arboreal Forest в целом близка ряду распределения, полученному традиционным способом.

В перспективе приложения для смартфонов могут стать эффективной альтернативой традиционным методам проведения перечислительной таксации и инвентаризации зеленых насаждений, но, учитывая разнообразие лесорастительных условий, породного состава лесов России, требуется разработка приложения, адаптированного к таким условиям.

### Список литературы

1. Васильева Е.А., Николаева О.Н., Трубина Л.К. Опыт подеревной инвентаризации и картографирования городских зеленых насаждений общего пользования. ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021; 27(3): 274-284. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-3-27-274-284>.
2. Муллаярова П.И. О необходимости совершенствования методики инвентаризации городских зеленых насаждений. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017; 4(2): 180-185. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29197832>.
3. Lebedev A.V. Changes in the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in an urban environment in European Russia since 1862. Journal of Forestry Research. 2023; 34: 1279-1287. DOI: <https://doi.org/110.1007/s11676-022-01569-z>.
4. Черданцева О.А., Жукова Е.А. О важности создания единой методики инвентаризации зеленых насаждений исторических садов в Санкт-Петербурге. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018; 222: 6-22. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.6-22>.
5. Муллаярова П.И. О модернизации существующей методики инвентаризации зеленых насаждений с учетом современных достижений аэрокосмических исследований и ГИС-технологий. Вестник СГУГиТ

(Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2018; 23(1): 132-141. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32834054>.

6. Злобин Д.В. Инвентаризация городских зеленых насаждений с использованием цифровых технологий. Экология: вчера, сегодня, завтра: Материалы всероссийской научно-практической конференции, Грозный, 30 октября 2019 года. Грозный: Общество с ограниченной ответственностью "АЛЕФ", 2019: 206-211. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41421672>.

7. Трубина Л.К., Николаева О.Н., Муллаярова П.И., Баранова Е.И. Инвентаризация городских зеленых насаждений средствами ГИС. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2017; 22(3): 107-118. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30037544>.

8. Alonzo M., Bookhagen B., Roberts D.A. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sensing of Environment*. 2014; 148: 70–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.018>.

9. Кабонен А.В., Иванова Н.В. Оценка биометрических характеристик деревьев по данным наземного lidar и разносезонной аэрофотосъемки в искусственных насаждениях. *Nature Conservation Research*. Заповедная наука. 2023; 8(1): 64-83. DOI: <https://doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.

10. Устинов С.М., Митрофанов Е.М., Устинов М.В. Исследование возможности использования наземного мобильного лазерного сканера для определения высот и диаметров деревьев в сосновых насаждениях. Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2023; 1(70): 134-140. DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2023.70.1.016>.

11. Proudman A., Ramezani M., Digumarti S.T., Chebrolu N., Fallon M. Towards real-time forest inventory using handheld LiDAR. *Robotics and Autonomous Systems*. 2022; 157: 104240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104240>.

12. Ritter T., Schwarz M., Tockner A., Leisch F., Nothdurft A. Automatic mapping of forest stands based on three-dimensional point clouds derived from terrestrial laser-scanning. *Forests*. 2017; 8: 265. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8080265>.

13. Gollob C., Ritter T., Wassermann C., Nothdurft A. Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots. *Remote Sens*. 2019; 11: 1602. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11131602>

14. Eitel J.U.H., Vierling L.A., Magney T.S. A lightweight, low cost autonomously operating terrestrial laser scanner for quantifying and monitoring ecosystem structural dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013; 180: 86–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.012>.

15. Bunting P., Armston J., Lucas R.M., Clewley D. Sorted pulse data (SPD) library. Part I: A generic file format for LiDAR data from pulsed laser systems in terrestrial environments. *Computers and Geosciences*. 2013; 56: 197–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.01.019>.

16. Costantino D., Vozza G., Pepe M., Alfio V.S. Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges. *Applied System Innovation*. 2022; 5: 63. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040063>.

17. Tomašík J., Saloň Š., Tunák D., Chudý F., Kardoš M. Tango in forests – An initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017; 141: 109-117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.015>.

18. Hyypä J., Virtanen J.-P., Jaakkola A., Yu X., Hyypä H., Liang X. Feasibility of Google Tango and Kinect for Crowdsourcing Forestry Information. *Forests*. 2018; 9(1): 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9010006>.

19. Spreafico A., Chiabrando F., Teppati Losè L., Giulio Tonolo F. The iPad Pro Built-in Lidar Sensor: 3D Rapid Mapping Tests and Quality Assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B1-2021*. 2021; 43: 63–69. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-63-2021>.

20. Luetzenburg G., Kroon A., Bjørk A.A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Scientific Reports*. 2021; 11: 22221. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>.

21. Vogt M., Rips A., Emmelmann C. Comparison of iPad Pro®'s LiDAR and TrueDepth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution. *Technologies*. 2021; 9(2): 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies9020025>.
22. Gollob C., Ritter T., Kraßnitzer R., Tockner A., Nothdurft A. Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology. *Remote Sensing*. 2021; 13: 3129. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163129>.
23. Woo H., Kim I., Choi B. Computer Vision Techniques in Forest Inventory Assessment: Improving Accuracy of Tree Diameter Measurement Using Smartphone Camera and Photogrammetry. *Sensors and Materials*. 2021; 33(11): 3835–3845. DOI: <https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3605>.
24. Sandim A., Amaro M., Silva M.E., Cunha J., Morais S., Marques A., Ferreira A., Lousada J.L., Fonseca T. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. *Forests*. 2023; 14: 1553. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14081553>.
25. Pitkänen T.P., Rätty M., Hyvönen P., Korhonen K.T., Vauhkonen J. Using auxiliary data to rationalize smartphone-based pre-harvest forest mensuration. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2022; 95(2): 247–260. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab039>.
26. Tatsumi S., Yamaguchi K., Furuya N. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*. 2023; 14: 1603–1609. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>.
27. Pace R., Masini E., Giuliarelli D., Biagiola L., Tomao A., Guidolotti G., Agrimi M., Portoghesi L., De Angelis P., Calfapietra C. Tree Measurements in the Urban Environment: Insights from Traditional and Digital Field Instruments to Smartphone Applications. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*. 2022; 48 (2): 113-123. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>.
28. Lindberg L. Forest data acquisition with the application Arboreal Forest: A study about measurement precision, accuracy and efficiency. Umeå, 2020: 54. Режим доступа: [https://stud.epsilon.slu.se/15456/7/lindberg\\_1\\_200331.pdf](https://stud.epsilon.slu.se/15456/7/lindberg_1_200331.pdf)
29. Luetzenburg G., Kroon A., Bjørk A.A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Sci Rep*. 2021; 11: 22221. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>.
30. Роувинен Т. Трестима – цифровые фотографии для таксации леса. *Сибирский лесной журнал*. 2014; 5: 69-76. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22740162>.
31. Carpentier M., Giguère P., Gaudreault J. Tree Species Identification from Bark Images Using Convolutional Neural Networks. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Spain. 2018; 1075-1081. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593514>.
32. Robert M., Dallaire P., Giguère P. Tree bark re-identification using a deep-learning feature descriptor. *17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, Ottawa, ON, Canada. 2020; 25-32. DOI: <https://doi.org/10.1109/CRV50864.2020.00012>.
33. Шевелев С.Л. Состояние и перспективы совершенствования нормативной базы таксации товарной структуры древостоев Сибири. *Лесная таксация и лесоустройство*. 2008; 1(39): 101-105. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21196651>.
34. Kottner S., Thali M.J., Gascho D. Using the iPhone's LiDAR technology to capture 3D forensic data at crime and crash scenes. *Forensic Imaging*. 2023; 32: 200535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fri.2023.200535>.
35. Monsalve A., Yager E.M., Tonina D. Evaluating Apple iPhone LiDAR measurements of topography and roughness elements in coarse bedded streams. *Journal of Ecohydraulics*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/24705357.2023.2204087>.

### References

1. Vasileva E.A., Nikolaeva O.N., Trubina L.K. Opyt poderevnoy inventarizacii i kartografirovaniya gorodskih zelenyh nasazhdenij obshchego pol'zovaniya. [A case-study of tree inventory and mapping of public green spaces]. InterCarto. InterGIS. 2021; 27(3): 274-284. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-3-27-274-284>.
2. Mullaiarova P.I. O neobходимosti sovershenstvovaniya metodiki inventarizacii gorodskih zelenyh nasazhdenij. [On the necessity of improving of technique for urban green space inventory]. Interekspo Geo-Sibir. 2017; 4(2): 180-185. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29197832>.
3. Lebedev A.V. Changes in the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in an urban environment in European Russia since 1862. Journal of Forestry Research. 2023; 34: 1279-1287. DOI: <https://doi.org/110.1007/s11676-022-01569-z>.
4. Cherdanceva O.A., Zhukova E.A. O vazhnosti sozdaniya edinoj metodiki inventarizacii zelenyh nasazhdenij istoricheskikh sadov v Sankt-Peterburge. [On the importance of creating the common methodology for green spaces inventory of historical gardens in St. Petersburg]. Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii. 2018; 222: 6-22. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.6-22>.
5. Mullayarova P.I. O modernizacii sushchestvuyushchej metodiki inventarizacii zelenyh nasazhdenij s uchetom sovremennykh dostizhenij aerokosmicheskikh issledovaniy i GIS-tekhnologij. [On modernization of current methods of urban green spaces inventory taking into account the achievements of remote sensing and geographic information system]. Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologij) = Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT). 2018; 23(1):132-141. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32834054>.
6. Zlobin D.V. Inventarizaciya gorodskih zelenyh nasazhdenij s ispol'zovaniem cifrovyykh tekhnologij. [Inventory of city green plants using digital technologies]. In: Ekologiya: vchera, segodnya, zavtra: Materialy vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Groznyj, 30 oktyabrya 2019 goda. Groznyj, Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "ALEF". 2019: 206-211. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41421672>.
7. Trubina L.K., Nikolaeva O.N., Mullayarova P.I., Baranova E.I. Inventarizaciya gorodskih zelenyh nasazhdenij sredstvami GIS. [GIS-based inventory of urban green spaces]. Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologij) = Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT). 2017; 22(3): 107-118. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30037544>.
8. Alonzo M., Bookhagen B., Roberts D.A. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. Remote Sensing of Environment. 2014; 148: 70–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.018>.
9. Kabonen A.V., Ivanova N.V. Ocenka biometricheskikh harakteristik derev'ev po dannym nazemnogo lidar i raznosezonnogo aerofotos'emki v iskusstvennykh nasazhdeniyah. [Tree attribute assessment in urban greenwood using ground-based lidar and multiseasonal aerial photography data]. Nature Conservation Research. 2023; 8(1): 64–83. (in Russ.). DOI: <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.
10. Ustinov S.M., Mitrofanov E.M., Ustinov M.V. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya nazemnogo mobil'nogo lazernogo skanera dlya opredeleniya vysot i diametrov derev'ev v osnovnykh nasazhdeniyah. [Study of the possibility of using a ground-based mobile laser scanner to determine the height and diameter of trees in pine plantations]. Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii im. V.R. Filippova. 2023; 1(70): 134-140. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2023.70.1.016>.
11. Proudman A., Ramezani M., Digumarti S.T., Chebrolo N., Fallon M. Towards real-time forest inventory using handheld LiDAR. Robotics and Autonomous Systems. 2022; 157: 104240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104240>.
12. Ritter T., Schwarz M., Tockner A., Leisch F., Nothdurft A. Automatic mapping of forest stands based on three-dimensional point clouds derived from terrestrial laser-scanning. Forests. 2017; 8: 265. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8080265>.
13. Gollob C., Ritter T., Wassermann C., Nothdurft A. Influence of Scanner Position and Plot Size on the



Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots. *Remote Sens.* 2019; 11: 1602. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11131602>

14. Eitel J.U.H., Vierling L.A., Magney T.S. A lightweight, low cost autonomously operating terrestrial laser scanner for quantifying and monitoring ecosystem structural dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2013; 180: 86–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.012>.

15. Bunting P., Armston J., Lucas R.M., Clewley D. Sorted pulse data (SPD) library. Part I: A generic file format for LiDAR data from pulsed laser systems in terrestrial environments. *Computers and Geosciences.* 2013; 56: 197–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.01.019>.

16. Costantino D., Vozza G., Pepe M., Alfio V.S. Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges. *Applied System Innovation.* 2022; 5: 63. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040063>.

17. Tomašík J., Saloň Š., Tunák D., Chudý F., Kardoš M. Tango in forests – An initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2017; 141: 109–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.015>.

18. Hyypä J., Virtanen J.-P., Jaakkola A., Yu X., Hyypä H., Liang X. Feasibility of Google Tango and Kinect for Crowdsourcing Forestry Information. *Forests.* 2018; 9(1): 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9010006>.

19. Spreafico A., Chiabrando F., Teppati Losè L., Giulio Tonolo F. The iPad Pro Built-in Lidar Sensor: 3D Rapid Mapping Tests and Quality Assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B1-2021.* 2021; 43: 63–69. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-63-2021>.

20. Luetzenburg G., Kroon A., Bjørk A.A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Scientific Reports.* 2021; 11: 22221. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>.

21. Vogt M., Rips A., Emmelmann C. Comparison of iPad Pro<sup>®</sup>'s LiDAR and TrueDepth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution. *Technologies.* 2021; 9(2): 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies9020025>.

22. Gollob C., Ritter T., Kraßnitzer R., Tockner A., Nothdurft A. Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology. *Remote Sensing.* 2021; 13: 3129. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163129>.

23. Woo H., Kim I., Choi B. Computer Vision Techniques in Forest Inventory Assessment: Improving Accuracy of Tree Diameter Measurement Using Smartphone Camera and Photogrammetry. *Sensors and Materials.* 2021; 33(11): 3835–3845. DOI: <https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3605>.

24. Sandim A., Amaro M., Silva M.E., Cunha J., Morais S., Marques A., Ferreira A., Lousada J.L., Fonseca T. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. *Forests.* 2023; 14: 1553. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14081553>.

25. Pitkänen T.P., Rätty M., Hyvönen P., Korhonen K.T., Vauhkonen J. Using auxiliary data to rationalize smartphone-based pre-harvest forest mensuration. *Forestry: An International Journal of Forest Research.* 2022; 95(2): 247–260. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab039>.

26. Tatsumi S., Yamaguchi K., Furuya N. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution.* 2023; 14: 1603–1609. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>.

27. Pace R., Masini E., Giuliarelli D., Biagiola L., Tomao A., Guidolotti G., Agrimi M., Portoghesi L., De Angelis P., Calfapietra C. Tree Measurements in the Urban Environment: Insights from Traditional and Digital Field Instruments to Smartphone Applications. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF).* 2022; 48 (2): 113–123. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>.

28. Lindberg L. Forest data acquisition with the application Arboreal Forest: A study about measurement precision, accuracy and efficiency. Umeå, 2020: 54. (in Sweden). URL: [https://stud.epsilon.slu.se/15456/7/lindberg\\_l\\_200331.pdf](https://stud.epsilon.slu.se/15456/7/lindberg_l_200331.pdf)

29. Luetzenburg G., Kroon A., Bjørk A.A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in

Geosciences. Sci Rep. 2021; 11: 22221. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>.

30. Rouvinen T. Trestima - цифровые фотографии для таксации леса. [Trestima - digital photographs for forest inventory]. Siberian Journal of Forest Science. 2014; 5: 69-76. (in Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22740162>.

31. Carpentier M., Giguère P., Gaudreault J. Tree Species Identification from Bark Images Using Convolutional Neural Networks. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain. 2018; 1075-1081. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593514>.

32. Robert M., Dallaire P., Giguère P. Tree bark re-identification using a deep-learning feature descriptor. 17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV), Ottawa, ON, Canada. 2020; 25-32. DOI: <https://doi.org/10.1109/CRV50864.2020.00012>.

33. Shevelev S.L. Sostoyanie i perspektivy sovershenstvovaniya normativnoj bazy taksacii tovarnoj struktury drevostoev sibiru [State and perspectives of the normative base improvement for inventorying the merchantable structure of Siberian tree stands]. Lesnaya taksaciya i lesoustrojstvo; 2008; 1(39): 101-105. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21196651>.

34. Kottner S., Thali M.J., Gascho D. Using the iPhone's LiDAR technology to capture 3D forensic data at crime and crash scenes. Forensic Imaging. 2023; 32: 200535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fri.2023.200535>.

35. Monsalve A., Yager E.M., Tonina D. Evaluating Apple iPhone LiDAR measurements of topography and roughness elements in coarse bedded streams. Journal of Ecohydraulics. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/24705357.2023.2204087>.

### Сведения об авторе

✉ *Лебедев Александр Вячеславович* – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры землеустройства и лесоводства, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434; научный сотрудник, ФГБУ «Государственный природный заповедник «Кологривский лес» имени М.Г. Сеницына», ул. Некрасова, 48, г. Кологрив, Костромская обл., Российская Федерация, 157440, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>, e-mail: [alebedev@rgau-msha.ru](mailto:alebedev@rgau-msha.ru)

### Information about the author

✉ *Aleksandr V. Lebedev* – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Land Organization and Forestry, *Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow city, Russian Federation, 127434; Researcher, Kologrivsky Forest Nature Reserve, Nekrasova st., 48, Kologriv town, Kostroma region, Russian Federation, 157440*, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>, e-mail: [alebedev@rgau-msha.ru](mailto:alebedev@rgau-msha.ru)

✉ – Для контактов | Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/6>

УДК 630\*161\*8



## Оценка хозяйственной ценности плодов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в Воронежской области

Татьяна С. Наконечная, [gyadnova.1997@mail.ru](mailto:gyadnova.1997@mail.ru),  <https://orcid.org/0009-0002-1177-9411>

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

Отбор перспективных форм лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) для лесоводства и плодородства в Воронежской области, является важнейшей задачей селекционной работы. Несмотря на высокую хозяйственную ценность данной породы, остаются неизученными урожайность и качество плодов в зависимости от условий произрастания, что важно для проведения селекционных работ. Целью работы является изучение фенологических особенностей, определение величины урожая (в зависимости от лесорастительных условий) и оценка качества плодов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) для выявления и отбора наиболее качественных исходных селекционных материалов. В задачи исследований входило: определить оптимальные лесорастительные условия для роста лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.), позволяющие получить наибольшее количество урожая; установить сроки наступления фенологических фаз для прогнозирования количества урожая и опосредованной оценки адаптивного потенциала; оценить качество плодов в зависимости от типов лесорастительных условий. Наступление фенологических фаз лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) начинаются с середины марта и заканчивается в июне. Несмотря на опасность весенних заморозков, лимитирующих культивирование лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в Воронежской области, выявленные фенологические особенности позволяют опосредованно рекомендовать широкое разведение наиболее устойчивых форм. Среднее количество урожая в С<sub>2</sub>Д достигает 2,6±0,12 кг. Кроме того, в данных лесорастительных условиях отмечено наибольшее варьирование количества урожая, что позволит провести отбор лучших форм. Выявлено, что наибольшее количество урожая и наилучшее качество плодов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) преобладает в типах лесорастительных условиях С<sub>2</sub>Д и Д<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** лещина обыкновенная, *Corylus avellana* L., фенология, урожайность, качество плодов, тип лесорастительных условий.

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

**Благодарности:** автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


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

**Для цитирования:** Наконечная, Т. С. Оценка хозяйственной ценности плодов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в Воронежской области / Т. С. Наконечная // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 71–86. – Библиогр.: с. 83–86 (24 назв.) – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/6>.

**Поступила:** 06.06.2023. **Пересмотрена:** 12.10.2023. **Принята:** 16.11.2023. **Опубликована онлайн:** 30.11.2023.

Article

## Economic worth assessment of the common hazel (*Corylus avellana* L.) fruits in the Voronezh region

Tatiana S. Nakonechnaya, ryadnova.1997@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0002-1177-9411>

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

### Abstract

The selection of promising forms of common hazel (*Corylus avellana* L.) for forestry and fruit growing in the Voronezh region is the most important task of breeding work. Despite the high economic value of this breed, the yield and quality of fruits depending on growing conditions remain unstudied, which is important for breeding work. The purpose of the work is to study the phenological characteristics, determine the size of the harvest (depending on forest conditions) and assess the quality of the fruits of common hazel (*Corylus avellana* L.) to identify and select the highest quality initial breeding materials. The objectives of the research included: determining optimal forest conditions for the growth of common hazel (*Corylus avellana* L.), allowing for the greatest amount of harvest; establish the timing of the onset of phenological phases to predict the amount of harvest and indirectly assess the adaptive potential; assess the quality of fruits depending on the types of forest conditions. The onset of phenological phases of common hazel (*Corylus avellana* L.) begins in mid-March and ends in June. Despite the danger of spring frosts, which limit the cultivation of common hazel (*Corylus avellana* L.) in the Voronezh region, the identified phenological features make it possible to indirectly recommend widespread breeding of the most resistant forms. The average yield in C<sub>2</sub>D reaches 2.6±0.12 kg. In addition, in these forest growing conditions, the greatest variation in the amount of harvest was noted, which will allow for the selection of the best forms. It was revealed that the largest quantity of harvest and the best quality of common hazel fruits (*Corylus avellana* L.) prevail in the types of forest growing conditions C<sub>2</sub>D and D<sub>2</sub>.

**Keywords:** common hazel (*Corylus avellana* L.), phenology, productivity, fruit quality, type of forest conditions.

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

**Acknowledgments:** the author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

**Conflict of Interest:** the author have declared no conflict of interest.

**For citation:** Nakonechnaya T. S. (2023). Assessment of the economic value of the fruits of (*Corylus avellana* L.) in the Voronezh region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 71-86. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/6>.

**Received** 06.06.2023. **Revised** 12.10.2023. **Accepted:** 16.11.2023. **Published online:** 30.11.2023.

### Введение

Изучение хозяйственной ценности плодов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в Воронежской области является важнейшей задачей селекционной работы. Это позволит выявить наиболее перспективные формы лещины обыкновенной

(*Corylus avellana* L.) для лесного и садового хозяйства.

Представители рода *Corylus* являются ценными орехоплодными растениями, культивируются во многих странах мира на плантациях и в личных хозяйствах, широко представлены в других естественных и искусственных насаждениях [4].

Европейский лесной орех (*Corylus avellana* L.) является одной из наиболее культивируемых орехоплодных культур в мире с постоянно растущей долей рынка [17]. В 2019 году мировое производство лесных орехов (*Corylus avellana* L.) в скорлупе составило 1 миллион тонн. Ведущей страной производителем является Турция - примерно 67% мирового производства, за ней следуют Италия (12%), Азербайджан (5%) и США (4%) [17].

Урожайность и качество плодов – ключевые показатели, характеризующие хозяйственную ценность плодов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.). Урожайность лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) под пологом леса с куста 0,05-1,5 кг, на открытых участках 2-4 кг; в культуре достигает 6-8 кг [2]. Биганова С.Г. (с соавторами) отмечают, что под пологом леса у лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) формируются несколько лучшие по качеству орехи, общая оценка составляет 34 балла (из 100 баллов), по сравнению с аналогами, выросшими на открытом пространстве, за счет лучшего раскалывания, вкуса и выхода ядра [1].

В центральных областях нашей страны лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.) плодоносит нерегулярно: обильный урожай бывает 1 раз в 6-7 лет, в отдельные годы его нет совсем [2]. Это лимитирует распространение данной породы в более северных регионах относительно естественного ареала.

Урожай подразделяют на потенциальный, общий и фактический [24]. Потенциально лещина плодоносит ежегодно. Сильнее всего колеблется по годам фактический урожай (наличие созревших плодов) [24].

Составить прогноз предстоящего урожая можно по данным наблюдений за цветением. Обилие хорошо перезимовавших тычиночных сережек и массовое распускание их в период цветения – первый показатель будущего обильного урожая [14]. Но для этого нужна благоприятная погода во время опыления, образования завязей и развития плодов. В качестве ориентировочных можно использовать сведения о наличии мужских сережек, так как между числом их и женских цветков имеется определенная связь: если первых мало, значит, урожай будет слабый [6].

В.А. Славский [21] отмечает, что для большинства орехоплодных пород в Воронежской области для успешного завязывания плодов и их полного вызревания необходимо накопление за год более 2650°C эффективных (+10 °C) температур. Полноценное развитие и вызревание плодов возможно и при меньшем количестве эффективных температур, но выявленная тенденция характеризует тесную связь погодных условий и репродуктивной способности растений.

В сортовых культурах, включая фундук (выведенный сорт из лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.)), фенология используется для организации управления посевами, прогнозирования урожаев, предотвращения риска повреждения морозом и прогнозирования популяций вредителей в зависимости от стадии растения [13,16].

На разных экспозициях склонов зацветает в разное время, на открытых местах растет и плодоносит лучше, чем под пологом леса [15-18]. Е. Öunaru-Pikas и А. Sellin отмечают, высокую светочувствительность листьев и скорость реакции гидравлической проводимости ( $K_L$ ) [23] лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) на быстрые изменения освещенности, которая в 3 раза выше у листьев размещенных на солнечной стороне по сравнению с листьями, находящимися в глубокой тени. Индексы пластичности  $K_L$  для листьев, освещенных солнцем, и листьев, находящихся в глубокой тени, составили 0,44 и 0,27 соответственно. Это подтверждает связь условий освещенности со сроками цветения и формирования плодов, что позволяет максимально использовать ресурсы в более благоприятных условиях окружающей среды [18].

В Европе и Северной Америке большинство сортов фундука (выведенный вид из лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.)) являются отборными клонами, и их орехи продаются на двух рынках: столовом (в скорлупе) и промышленном (только с ядрами) [24]. Сорта в скорлупе употребляют в пищу зелеными, свежими или сушеными. Это еще раз подтверждает актуальность проблемы и характеризует повышенную хозяйственную ценность плодов.

Изучением лещины обыкновенной (*C. avellana* L.) на территории России в разные годы занимались многие ученые – Ф.Л. Щепотьев [20],

С.Г. Биганова [1], Т.А. Исуцева [3] и др. В их работах отражены актуальные теоретические и методологические аспекты селекции и интродукции культуры.

Биганова С.Г. и Исуцева Т.А. изучение лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) ведут на территории Северного Кавказа, определяя морфологические признаки, адаптивный и репродуктивный потенциал растений и особенности изменения показателей качества плодов в зависимости от условий произрастания [1,2,3,4,6,8]. Щепотьев Ф.Л. вел изучение орехоплодных пород в разрезе производства продовольствия и промышленного сырья для различных отраслей экономики [20].

Следует отметить, что масштабных исследований лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в Воронежской области не проводилось.

Остаются неизученными урожайность и качество плодов в зависимости от условий произрастания, что крайне важно для проведения селекционных исследований.

Показателем успешного развития и адаптации лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) является цветение и своевременно вступление в

стадию плодоношения. Основным признаком, характеризующим урожайность лещины, считается количество сережек (рис. 1). Следовательно, для предварительного выявления перспективных продуктивных форм, необходимо изучить фенологические особенности лещины обыкновенной.

Таким образом, целью работы является определение величины урожая и качества плодов (в зависимости от лесорастительных условий) для выявления и отбора наиболее перспективных исходных селекционных материалов.

В задачи исследований входило:

- определить оптимальные лесорастительные условия для роста лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.), позволяющие получить наибольшее количество урожая;
- установить сроки наступления фенологических фаз для прогнозирования количества урожая и опосредованной оценки адаптивного потенциала;
- оценить репродуктивную способность и качество плодов в зависимости от типов лесорастительных условий.



А  
А

Б  
В

В  
С

Рисунок 1. Фенологические стадии лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.)

а – Стадия набухания мужских сережек, б – Стадия цветения и опыления, в – Стадия созревания орехов

Figure 1. Phenological stages of common hazel (*Corylus avellana* L.)

a - The stage of swelling of male earrings, b - The stage of flowering and pollination, c - The stage of maturation of nuts

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

### Материалы и методы

#### Предмет и объект исследований

Исследования проводились на территории Пригородного лесничества (включающего в себя 3 участковых лесничества, расположенные в различ-

ных ландшафтных зонах) Воронежской области. Лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.) встречается повсеместно на территории исследуемого региона в различных лесорастительных условиях – от А<sub>1</sub> до D<sub>4</sub> (по шкале Погребняка П.Б.) [11]. Рельеф

на всей территории исследования – ровный, склоны не более 5°. Перечень объектов исследования и их территориальное расположение представлены в табл. 1 (указаны координаты центров пробных площадей).

Предмет исследований – процессы изучения фенофаз и оценки качества плодов. Исследования направлены на оценку продуктивности лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.), качества плодов, и выявления фенологических особенностей перспективных форм лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в различных группах свежих типов лесорастительных условий.

### Сбор данных

Ранее установлено [10], что наиболее благоприятны для роста и плодоношения лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) свежие типы лесорастительных условий (ТЛУ) – В<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>Д, и Д<sub>2</sub>, в которых были заложены пробные площади (размером 50×50 м = 0,25 га каждая). На каждой пробной площади произведен сплошной пересчет лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) с определением возраста, высоты, густоты и других показателей (табл. 1). Детально изучены особенности плодоношения и качества плодов по размеру плодов, массе плодов, вкусу ядра, выходу ядра, толщине скорлупы. При сборе полевого материала учтены рекомендации Б.А. Доспехова [12].

Фенология определялась стандартной общепринятой методикой [5, 11, 20], с учетом региональных особенностей Воронежской области [19, 21, 22]. При проведении фенологических наблюдений фиксировались сроки начала и окончания фенологических фаз. Продуктивность плодоношения определяли на основе действующего стандарта (ОСТ 56-83-85 «Методы определения урожая и ресурсов»). На каждой пробной площади создавались 2-3 учетные линии на равном расстоянии друг от друга в поперечном направлении, в зависимости от проективного покрытия выдела. На каждой учетной линии закладывали учетные площадки размером 4×4 м. Для определения качества плодов использовали методики С.Г. Бигановой и Ю.И. Сухоруких [1]. Качество плодов определялось как интегральная величина основных критериев (размеры, масса, вкус и выход ядра, толщина и твердость скорлупы)

оцениваемых по пятибалльной шкале. При определении вкусовых характеристик использована классическая пятибалльная шкала [20], где плоды десертного вкуса имеют 5 баллов, а непригодные в пищу – 1 балл. Общая оценка качества плодов определялась на основе методического подхода, предложенного В.А. Славским (с соавт.) [20]. Выделенные показатели качества плодов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.), разбиты на отдельные категории и имеют следующую структуру: по массе и размерам плодов; по толщине и твердости скорлупы; по выходу ядра; по вкусовым качествам плодов. Общее качество плодов можно рассматривать как среднее по пятибалльной системе определения.

### Анализ данных

Плоды изучались в зависимости от различных типов лесорастительных условий, а также густоты произрастания лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) на изучаемых участках. Исследования проводились в трех повторностях на протяжении трех лет в период с 2020 по 2022 годы. Объем выборки определялся из расчета не менее 100 штук плодов с каждой пробной площади, что обеспечило репрезентативность исследований. Объем выборки при изучении качества плодов в 2020 году составил 1100 штук, в 2021 году – 1050 штук, а в 2022 году – 1300 штук. Используются методы описательной статистики и дисперсионного анализа при уровне значимости 0,05. Критерий достоверности рассчитывался с помощью формулы:

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}} \quad (1)$$

Примечание: M<sub>1</sub> и M<sub>2</sub> - статистические величины, полученные при проведении выборочных исследований; m<sub>1</sub> и m<sub>2</sub> - их ошибки репрезентативности; t - коэффициент достоверности.

Математическая обработка экспериментального материала выполнена с использованием статистических программ STATISTIKA – 13.0 и Microsoft Office Excel 2016 for Windows<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Шевелина И. В., Нуриев Д. Н. Статистическая обработка лесоводственно-таксационной информации в среде STATISTIKA. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. – 112 с. ISBN 978-5-94984-840-1. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777>.



## Природопользование

Так как динамика исследуемых фенологических фаз существенно зависит от погодных условий (прежде всего, температурного режима и коли-

чества осадков) были изучены среднесуточные показатели по месяцам за 2020 по 2022 годы, которые приведены на рис. 2, 3 [7].

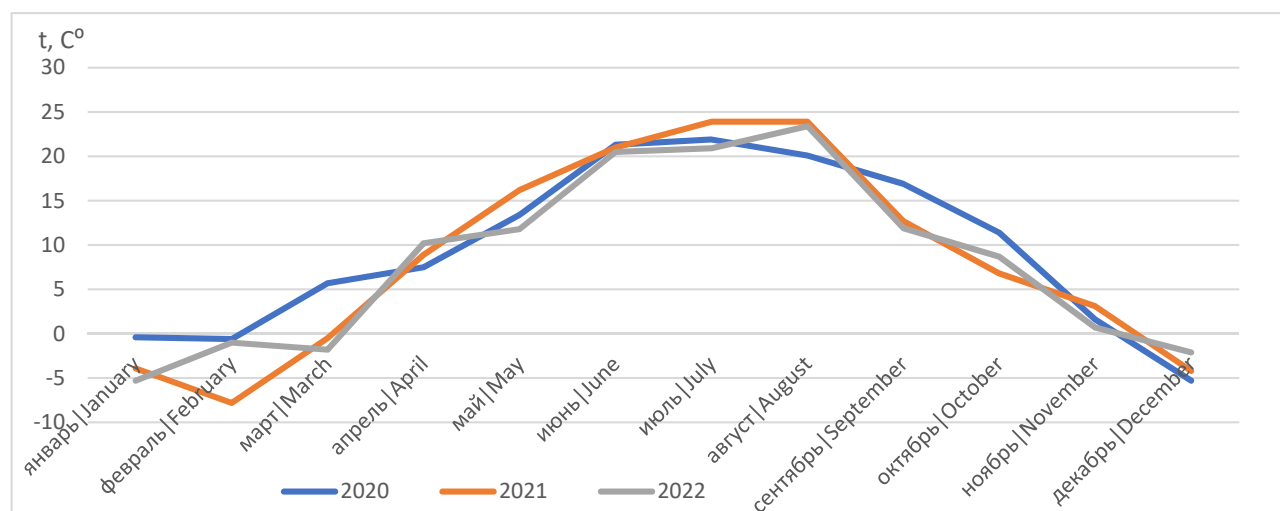


Рисунок 2. Среднесуточные температуры воздуха за 2020-2022 годы

Figure 2. Average daily air temperatures for 2020-2022

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

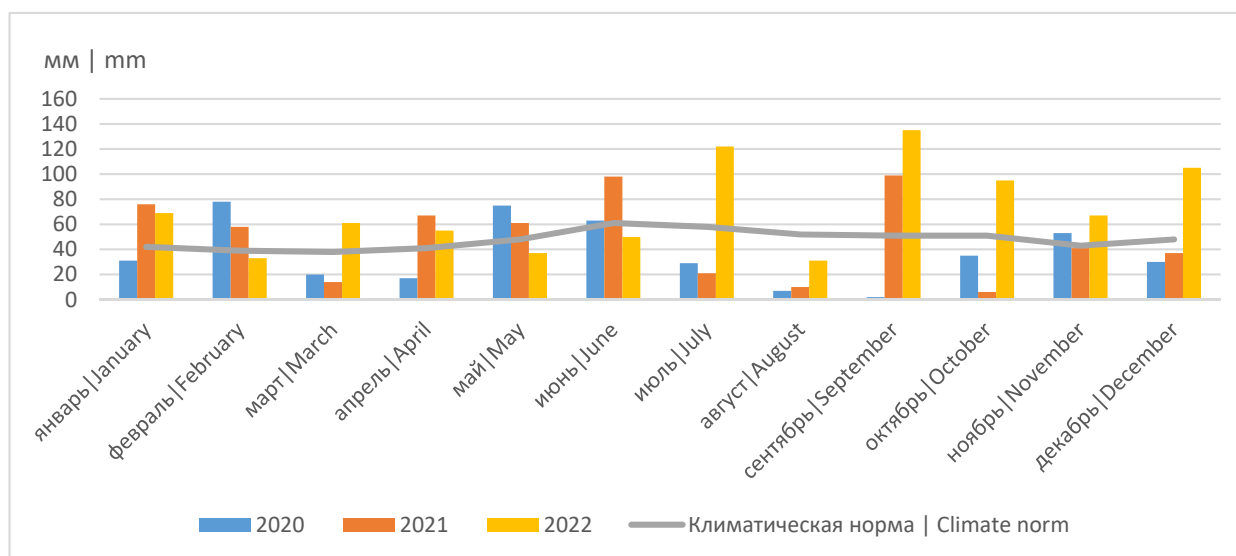


Рисунок 3. Выпавшие среднесуточные осадки за 2020-2023 г.

Figure 3. Average daily precipitation for 2020-2023

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

На рис. 2 видно, что устоявшаяся положительная среднесуточная температура воздуха 5 °C и более выявлена в марте 2020 года, а в 2022 году данного показателя температура достигает в апреле. Наиболее интенсивное накопление эффектив-

ных температур наблюдается в период с марта по май 2022 года, что обусловило высокую урожайность. В 2021 году отмечена наихудшая урожайность лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.)



## Природопользование

за исследуемый период в связи с медленным накоплением эффективных температур в марте-мае.

На рис. 3 отмечено, что максимальное превышение климатической нормы по количеству осадков наблюдается в 2022 году, а в 2020 году зафиксировано наименьшее количество осадков за год. С 1 июля 2022 года подведомственные учре-

ждения Росгидромета перешли на использование в оперативно-производственной практике климатических норм, рассчитанных за период 1991-2020 годы [9]. Следовательно, можно сделать вывод о связи количества осадков (особенно в летние месяцы) с количеством урожая.

Таблица 1

Общие сведения об объектах исследования и произрастающих на них древостоях

Table 1

General information about the objects of study and the trees growing on them

Участковое лесничество   District forestry	№ пп	Квартал/выдел   Quarter/department	Широта   Latitude	Долгота   Longitude	Высота над уровнем моря, м   Height above sea level, m	Тип лесорастительных условий   Type of forest conditions	Тип леса   Type of forest	Состав древостоя   The composition of the stand	Возраст древостоя, лет   Age of the tree stand, years
Правобережное	1	44/7	51,4507	39,1147	179	C <sub>2</sub> D	D <sub>осн</sub>	10ДНН+Ос+Б+Лп	100
Правобережное	2	2/10	51,4812	39,1421	167	C <sub>2</sub> D	D <sub>осн</sub>	5ЛП5ОС+КЛО	25
Правобережное	3	53/12	51,4426	39,1246	159	D <sub>2</sub>	D <sub>сн</sub>	7ДНН3Лп+ЯОН+Клп	87
Правобережное	4	44/8	51,4507	39,1159	177	C <sub>2</sub>	C <sub>дсн</sub>	10СО	57
Левобережное	5	44/17	51,4827	39,1855	168	B <sub>2</sub>	C <sub>срт</sub>	8С2ДНН	152
Правобережное	6	44/25	51,4503	39,1202	176	C <sub>2</sub> D	D <sub>осн</sub>	9ДНН1Ос+Б+ЛП+С	112
Животиновское	7	37/39	51,5326	39,1404	166	C <sub>2</sub> D	D <sub>осн</sub>	9ДНП1Ос+Б	90
Правобережное	8	54/49	51,4406	39,1213	168	C <sub>2</sub> D	D <sub>осзл</sub>	10ДНН+Лп+ЯОН+Кл	110
Правобережное	9	48/49	51,4424	39,1143	173	B <sub>2</sub>	C <sub>срт</sub>	6ДНП2Клн2Ос	110
Правобережное	10	42/38	51,4521	39,1133	172	C <sub>2</sub> D	D <sub>осн</sub>	8Ос2ДНП	82

*Источник: собственные измерения и вычисления автора*

*Source: author's own measurements and calculations*

Характеристики лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) на объектах исследования

Table 2

Characteristics of common hazel (*Corylus avellana* L.) at the study sites

Участковое лесничество   District forestry	№ пп	Квартал/выдел   Quarter/department	Возраст, лет   Age	Высота, м   Height	Густота   Density	Плодоношение   Fruiting	Число измеренных кустов   Number of measured bushes
Правобережное	1	44/7	16	2,5±0,11	густая	среднее	13
Правобережное	2	2/10	15	2,5±0,12	средняя	редкое	11
Правобережное	3	53/12	15	2,0±0,09	средняя	среднее	10
Правобережное	4	44/8	14	2,0±0,08	густая	среднее	14
Левобережное	5	44/17	18	3,0±0,16	редкая	редкое	8
Правобережное	6	44/25	16	3,0±0,17	густая	редкое	7
Животиновское	7	37/39	15	2,5±0,13	густая	среднее	10
Правобережное	8	54/49	17	2,5±0,11	густая	среднее	11
Правобережное	9	48/49	15	2,5±0,12	густая	среднее	12
Правобережное	10	42/38	16	3,0±0,16	средняя	редкое	8

*Источник: собственные измерения и вычисления автора*  
*Source: author's own measurements and calculations*

### Результаты и обсуждения

Поскольку исследуемые пробные площади были заложены в условиях ровного рельефа, сроки

фенологических фаз в первую очередь зависели от погодных условий (табл. 3) и биологических особенностей изучаемых форм.

Таблица 3

Сроки наступления фенологических фаз у лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в Воронежской области

Table 3

The timing of the onset of phenological phases in the common hazel (*Corylus avellana* L.) in the Voronezh region

Года наблюдений   Years of observations	Цветение мужских цветков   Blooming male flowers			Цветение женских цветков   Flowering female flowers			Набухание почек   Kidney swelling
	Начало   Start	Окончание   Ending	Длительность периода   Duration of the period	Начало   Start	Окончание   Ending	Длительность периода   Duration of the period	
2020	14.03	21.03	8	18.03	25.03	8	07.03
2021	25.03	01.04	8	28.03	04.04	8	18.03
2022	23.03	30.03	8	27.03	03.04	8	16.03

Года наблюдений   Years of observations	Листораспускание   Leaf blooming			Формирование плодов   Fruit formation			Созревание плодов   Fruit ripening		
	Начало   Start	Окончание   Ending	Длительность периода   Duration of the period	Начало   Start	Окончание   Ending	Длительность периода   Duration of the period	Начало   Start	Окончание   Ending	Длительность периода   Duration of the period
2020	31.03	01.05	32	02.04	20.06	79	27.08	18.09	22
2021	10.04	10.05	31	06.04	22.06	77	26.08	20.09	25
2022	11.04	11.05	31	05.04	29.06	85	27.08	20.09	24

*Источник: собственные измерения и вычисления автора*

*Source: author's own measurements and calculations*

В таблице 3 мы можем наблюдать, что цветение мужских цветков наступает в середине марта, после чего начинается листораспускание. Формирование плодов происходит с начала апреля и до конца июня. Плоды созревают с конца августа по середину сентября. Наибольший формирования плодов отмечен в 2022 году 85 дней это позволило достичь полного вызревания урожая и получить более качественные плоды.

На исследуемых объектах лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.) вступила в стадию плодоношения в возрасте 6-10 лет. Стабильное плодо-

ношение наступает через пару лет. По результатам исследования установлено, что опыление длится всего 3-6 дней, когда среднесуточная температура воздуха выше 5 °С. Количество плодов в одном соплдии колеблется от 1 до 4 штук. После оплодотворения наступает фаза формирования и роста плода.

Для достижения поставленной задачи по изучению качества плодов исследуемый материал был собран в свежих типах лесорастительных условиях: - В<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>Д, Д<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>. На рис. 4 представлены усредненные данные за три года.

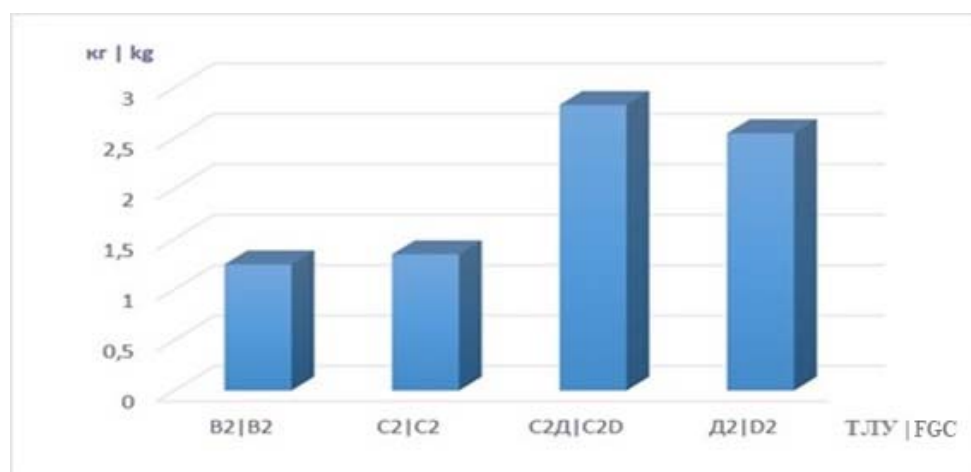


Рисунок 4. Продуктивность лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в различных ТЛУ

Figure 4. Productivity of common hazel (*Corylus avellana* L.) in various FGC

Источник: собственная композиция автора

Source: author's own composition

На рис. 5 представлены диаграммы, отражающие количество урожая лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.), за 2020-2022 годы, из которой

видно, что наилучших показателей исследуемая порода достигает в лесорастительных условиях С<sub>2</sub>Д<sub>2</sub> и Д<sub>2</sub>.

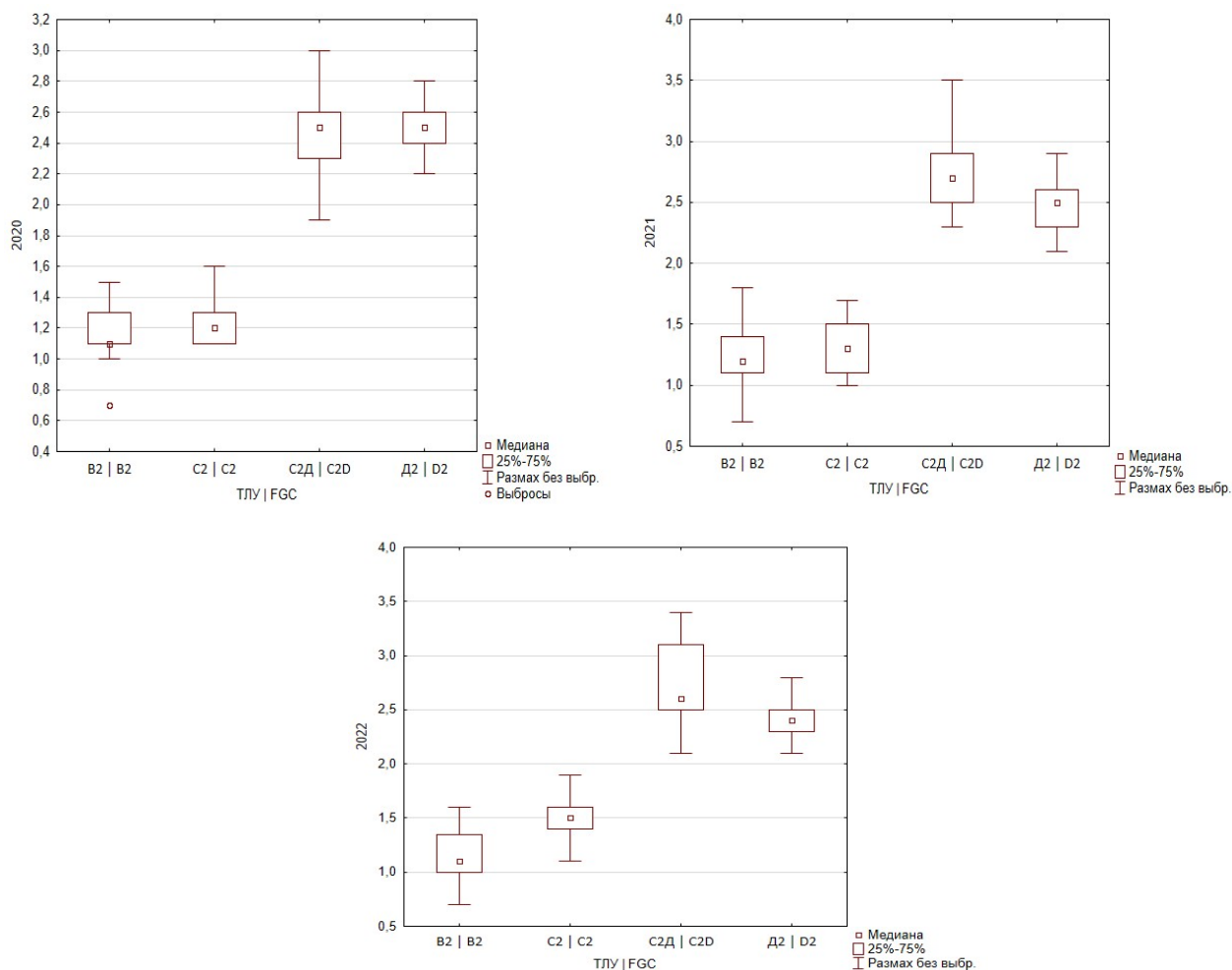


Рисунок 5. Урожай (кг) лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в разных ТЛУ по годам  
 Figure 5. Harvest (kg) of common hazel (*Corylus avellana* L.) in different FGC by year

Источник: собственная композиция автора  
 Source: author's own composition

Среднее значения рассматриваемого признака в С<sub>2</sub>Д достигает 2,6±0,12 кг. Наибольшее варьирование количества урожая так же отмечены в типе лесорастительных условий С<sub>2</sub>Д, что позволит провести отбор лучших форм. Схожие показатели урожайности отмечены в Д<sub>2</sub>. Формы, произрастающие в данных лесорастительных условиях, представляют наибольший селекционный интерес. Наименьшая вероятность отбора перспективных форм лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) выявлена в В<sub>2</sub>. Среднее количество урожая не превышает 1,5 кг.

В табл. 4 приведены обработанные методами математической статистики обобщенные средние параметры плодов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) в свежих типах лесорастительных условиях (В<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>Д Д<sub>2</sub>).

Математическая обработка полученных результатов выполнена с применением дисперсионного анализа, в результате которого выявлены достоверности различий (t) между средними статистическими показателями, отражающими качество плодов, в зависимости от типов лесорастительных условий (табл. 5).

Количественные и качественные показатели плодов лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.)  
в зависимости от ТЛУ

Table 4

Quantitative indicators of common hazel endocarps in FGC

Оценочный признак   Evaluation sign	B <sub>2</sub>   B <sub>2</sub>		C <sub>2</sub>   C <sub>2</sub>		C <sub>2</sub> D   C <sub>2</sub> D		D <sub>2</sub>   D <sub>2</sub>	
	(M±m)	Cv, %	(M±m)	Cv, %	(M±m)	Cv, %	(M±m)	Cv, %
Длина плодов, см   Fruit length, cm	0,80±0,015	12,1	0,82±0,016	12,7	1,02±0,027	16,4	0,94±0,023	15,2
Ширина плодов, см   Fruit width, cm	0,70±0,014	11,1	0,79±0,014	11,5	1,00±0,025	15,2	0,84±0,021	13,2
Масса плодов, г   Fruit weight, g	1,05±0,022	10,6	1,10±0,025	11,1	1,65±0,035	14,8	1,33±0,030	13,9
Выход ядра, %   Core output, %	31,1±0,44	9,3	32,2±0,51	9,6	35,0±0,53	9,6	34,5±0,45	8,8
Толщина скорлупы, мм   Shell thickness, mm	0,58±0,009	11,2	0,61±0,009	10,8	0,60±0,009	10,4	0,61±0,009	10,7
Вкус ядра, балл   Taste of the core, score	4,1		4,3		4,3		4,3	
Общее качество пло- дов, балл   General fruit quality, score	3,8		4,0		4,3		4,2	

*Примечание:* M±m – среднее значение признака и его ошибка; Cv – коэффициент изменчивости.  
where M ± m - is the mean value of the feature and its statistical error; Cv is the coefficient of variability.

*Источник:* собственные измерения и вычисления авторов  
*Source:* author's own measurements and calculations

Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что для размеров плодов характерна средняя степень изменчивости. Диапазон изменчивости варьирует от 12,1 % в типе лесорастительных условий B<sub>2</sub> до 16,4 % в C<sub>2</sub>D. Наименьшая вариативность встречается у выхода ядра - от 8,8 % в типе лесорастительных условий D<sub>2</sub> до 9,6 % в типах лесорастительных условий C<sub>2</sub>D и C<sub>2</sub>. Изменчивость у таких показателей как: масса плодов и толщина скорлупы

низкая. Изменчивость массы плодов в типе лесорастительных условий C<sub>2</sub>D достигает 14,8 %, а в типе лесорастительных условий B<sub>2</sub> она равна 10,6 %.

Установлено, что наилучшим качеством плодов обладают формы, произрастающие на более плодородных почвах – ТЛУ C<sub>2</sub>D и D<sub>2</sub> - 4,3 и 4,2 балла соответственно.

Таблица 5

Достоверность различий между средними величинами критериев качества плодов (при t<sub>0,05</sub> = 1,96)

Table 5

Reliability of differences between the average values of fruit quality criteria (at t<sub>0,05</sub> = 1.96)

Масса плодов   Fruit weight	Тип лесорастительных условий   Type of forest conditions				Толщина скорлупы   Shell thickness	Тип лесорастительных условий   Type of forest conditions			
	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> D		B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> D
B <sub>2</sub>	-	1,52	7,56	14,63	B <sub>2</sub>	-	0,24	0,24	0,16
C <sub>2</sub>	1,52	-	8,46	12,79	C <sub>2</sub>	0,24	-	-	0,08
D <sub>2</sub>	7,56	8,46	-	6,96	D <sub>2</sub>	0,24	-	-	0,08
C <sub>2</sub> D	14,63	12,79	6,96	-	C <sub>2</sub> D	0,16	0,08	0,08	-

Выход ядра   Taste of the core	Тип лесорастительных условий   Type of forest conditions				Размер плодов   Fruit size	Тип лесорастительных условий   Type of forest conditions			
	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> D		B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> D
B <sub>2</sub>	-	1,63	5,41	5,66	B <sub>2</sub>	-	0,91	5,19	7,09
C <sub>2</sub>	1,63	-	3,30	3,80	C <sub>2</sub>	0,91	-	4,29	6,45
D <sub>2</sub>	5,41	3,30	-	0,70	D <sub>2</sub>	5,19	4,29	-	2,29
C <sub>2</sub> D	5,66	3,80	0,70	-	C <sub>2</sub> D	7,09	6,45	2,29	-

Источник: собственные измерения и вычисления авторов

Source: author's own measurements and calculations

На основании рассчитанной достоверности различий (табл. 5) можно сделать вывод, о том, что толщина скорлупы не зависит от типа лесорастительных условий. Масса и размер плодов взаимосвязаны между собой и существенно зависят от типов лесорастительных условий, в которых они произрастают. Выход ядра в меньшей степени зависит от типа лесорастительных условий, но при этом достоверные различия наблюдаются в отдельных типах лесорастительных условий.

#### Выводы

1. В ходе проведения оценки хозяйственной ценности по урожайности и качеству плодов выявлено, что наилучшие количественные и качественные показатели данная культура достигает при разведении в типах лесорастительных условий C<sub>2</sub>D и D<sub>2</sub>. Лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.) в дубравах отличается более высокой продуктивностью – на 25 % выше, чем у аналогов, произрастающих в остальных типах лесорастительных условий.

2. Установлено что наступление фенологических фаз лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) начинаются с середины марта и заканчивается в июне. Несмотря на опасность весенних заморозков, лимитирующих культивирование лещины в Воронежской области, выявленные фенологические особенности (более позднее цветение и листораспускание по сравнению с аналогами из южных регионов) позволяют опосредованно рекомендовать широкое разведение наиболее устойчивых форм. Самое раннее начало цветения и листораспускания выявлено 14 марта и 31 марта, что на 10-12 дней позже, чем у южных форм, произрастающих в естественном ареале на территории России.

3. Среднее значения рассматриваемого признака в C<sub>2</sub>D достигает 2,6±0,12 кг. Наибольшее варьирование количества урожая так же отмечены в типе лесорастительных условий C<sub>2</sub>D, что позволит провести отбор лучших форм. Схожие показатели урожайности отмечены в D<sub>2</sub>. Формы, произрастающие в данных лесорастительных условиях, представляют наибольший селекционный интерес. Наименьшая вероятность отбора перспективных форм лещины обыкновенной (*Corylus avellana* L.) выявлена в B<sub>2</sub>. Среднее количество урожая не превышает 1,5 кг.

4. Общее качество плодов в зависимости от типа лесорастительных условий варьирует от 3,8 до 4,3 баллов. Однако, в пределах каждого типа лесорастительных условий, выявлены средний и повышенный уровни изменчивости, что позволяет провести отбор лучших форм для успешного разведения лещины с хорошим качеством плодов. Показатель качества плодов зависит от типов лесорастительных условий, в которых они произрастают. Наилучшего комплексного показателя, характеризующего общее качество плодов, лещина обыкновенная (*Corylus avellana* L.) достигает в типах лесорастительных условий C<sub>2</sub>D – 4,3 балла и D<sub>2</sub> – 4,2 балла.

Таким образом, оптимальными лесорастительными условиями для выращивания лещины с плодами хорошего качества являются C<sub>2</sub>D и D<sub>2</sub>. Полученные результаты могут использоваться в области охраны, защиты и воспроизводства лесов при формировании устойчивых высокопродуктивных насаждений и увеличения биоразнообразия.

## Список литературы

1. Биганова, С. Г. Уточнение методики оценки устойчивости лещины (фундука) к стрессовым факторам / С. Г. Биганова, Ю. И. Сухоруких, Э. К. Пчихачев // Новые технологии. 2021. – Т. 17, № 5. – С. 106-113. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47422344>
2. Морфологические показатели крон лещины в горных лесах / С. Г. Биганова, Ю. И. Сухоруких, К. Н. Кулик, А. К. Кулик // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 2. С. 59–72. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48211750>
3. Биганова, С. Г. Изучение морфологической изменчивости некоторых признаков листьев лещины обыкновенной для целей декоративного садоводства /С. Г. Биганова, Ю. И. Сухоруких, Т. А. Исуцева // Субтропическое и декоративное садоводство. 2019. - № 68. – С. 27-31. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37623380>.
4. Разнообразие орехов лещины обыкновенной (*Corylus avellana*L.) и прогноз встречаемости ее форм на Северо-Западном Кавказе / С. Г. Биганова, Ю. И. Сухоруких, К. Н. Кулик, А. К. Кулик // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 3(375). – С. 55-71. – DOI 10.37482/0536-1036-2020-3-55-71.
5. Мигунова, Е. С. Лесная типология и ботаника. Экологическая оценка факторов природной среды / Е. С. Мигунова // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 65-81. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-4-65-81>.
6. Исуцева, Т. А. Формовое разнообразие *Corylus avellana* L. (лещины обыкновенной) по качеству плодов в Республике Адыгея : специальность 06.01.05 «Селекция и семеноводство сельскохозяйственных растений» : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Исуцева Татьяна Анатольевна ; Майкопский гос. техн. ун-т. – Майкоп, 2014. – 22 с.
7. Погода и климат Воронежа. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения 13.11.2023 г.).
8. Пчихачев Э. К. Особенности весенней вегетации листьев лещины в условиях предгорий Республики Адыгея / Э. К. Пчихачев, Т. А. Исуцева //Новые технологии. 2020. Т. 16, № 6. С. 79-88. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44883800>.
9. Росгидромет. – URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/28963/> (дата обращения 13.11.2023 г.).
10. Изучение биоразнообразия и оценка состояния лещины обыкновенной в Воронежской области / В. А. Славский, Т. С. Наконечная, Е. В. Титов, З. Говедар // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 3 (47). – С. 51–61. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.3/5.
11. Славский, В. А. Прогноз расширения границ площадей, пригодных для создания ореха грецкого в Воронежской области / В. А. Славский // Лесотехнический журнал. – 2018. – № 4 (32). – Т. 8. – С. 129-136. DOI: 10.12737/article\_5c1a321c2832e4.03254814.
12. Шевелина И. В., Нуриев Д. Н. Статистическая обработка лесоводственно-таксационной информации в среде STATISTICA. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. – 112 с. ISBN 978-5-94984-840-1.Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777>.
13. Ascari, L. Relationships between yield and pollen concentrations in Chilean hazelnut orchards. 2020, 115, 126036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126036>.
14. Harold, Arias-Leclaire Role of seed size, phenology, oogenesis and host distribution in the specificity and genetic structure of seed weevils (*Curculio* spp.) in mixed forests / Arias-Leclaire Harold, R. Bonal, García-López Daniel, M. Espelta Josep // Integr Zool. 2018, 13(3). P. 267-279. DOI: 10.1111/1749-4877.12293.
15. Extraction, identification, and quantification of antioxidant phenolics from hazelnut (*Corylus avellana* L.) shells / Y. Bo, L. Mei, Kent M. Eskridge, D. Isom Loren, A. Milford Hanna // 2018, 244, Pages 7-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.116>
16. Bregaglio, S. et al. The HADES Yield prediction system – A case study on the Turkish hazelnut sector. 2021, 12. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665471>

17. Cerulli, A. Metabolite profiling of “green” extracts of *Corylus avellana* leaves by 1H NMR spectroscopy and multivariate statistical analysis / A. Cerulli, M. Masullo, P. Montoro et al // Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2018, 160, Pages 168–178. DOI: doi.org/10.1016/j.jpba.2018.07.046.
18. Õunapuu-Pikas E., Plasticity and light sensitivity of leaf hydraulic conductance to fast changes in irradiance in common hazel (*Corylus avellana* L.) / E. Õunapuu-Pikas, A. Sellin // Plant Science. 2020, 290. DOI: doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110299.
19. Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain. / V. Slavskiy, D. Litovchenko, S. Matveev, S. Sheshnitsan, M. Larionov // Land. 2023, 12, 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12010103>.
20. Slavskiy V. A. A comprehensive assessment of the sustainability of nuts of the genus *Juglans* on adaptive features in the Voronezh region / V. A. Slavskiy, A. N. Vodolazhsky, S. G. Biganova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Jubilee Scientific and Practical Conference "Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)". 2019. P. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012007
21. Slavskiy, V.A. Assessment of economically valuable forms of fruit of the genus *Juglans* for the creation of forest crops in the Voronezh region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International scientific and practical conference "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions" (Forestry-2019). 2019. P. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012007
22. Slavskiy, V., Horbachenko S. The impact of changes in climatic conditions on the dynamics of the phenology of species of nuts of the genus *Juglans* in the Voronezh region (Russia) / V. Slavskiy, S. Horbachenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions". 2020. P. 012049. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012049
23. Validation of a high-throughput method for the accurate quantification of secondary products of lipid oxidation in high-quality hazelnuts (*Corylus avellana* L.) / S. Squara, A. Caratti, F. Ortega Gavilan, P. Bolzoni, N. Spigolon, G. Genova, G. Castello, M. Gracia Bagur González, L. Cuadros-Rodríguez, C. Bicchi, C. Cordero // A robust tool for quality assessment. 2022. 114, P. 104766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104766>
24. Phenological growth stages of ‘Barcelona’ hazelnut (*Corylus avellana* L.) described using an extended BBCH scale / A. Paradinas, L. Ramade, C. Mulot-Greffeuille, R. Hamidi, T. Maud, J. Toillon // 2022, 296, 110902 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110902>.

### References

1. Biganova, S. G. Utochnenie metodiki ocenki ustojchivosti leshchiny (funduka) k stressovym faktoram / S. G. Biganova, YU. I. Suhorukih, E. K. Pchihachev // Novye tekhnologii. 2021. – T. 17, № 5. – S. 106-113. Rezhim dostupa: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47422344>
2. Morfologicheskie pokazateli kron leschiny v gornih lesah / S. G. Biganova, Yu. I. Suhorukih, K. N. Kulik, A. K. Kulik // Izv. vuzov. Lesn. jurn. 2022. № 2.- S. 59–72. Rezhim dostupa: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48211750>
3. Biganova, S. G. Izuchenie morfologicheskoi izmenchivosti nekotoryh priznakov listev leschiny obiknovennoi dlya celei dekorativnogo sadovodstva / S. G. Biganova, Yu. I. Suhorukih, T. A. Isuscheva // Subtropicheskoe i dekorativnoe sado\_vodstvo. 2019. - № 68. – S. 27-31. Rezhim dostupa: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37623380>.
4. Raznoobrazie orehov leschiny obiknovennoi (*Corylus avellana*L.), i prognoz vstrechae\_mosty ee form na Severo-Zapadnom Kavkaze / S. G. Biganova, Yu. I. Suhorukih, K. N. Kulik, A. K. Kulik // Izve-stiya visshih uchebnykh zavedenii. Lesnoi jurnal. – 2020. – № 3-375., – S. 55-71. – DOI 10.37482/0536-1036-2020-3-55-71.
5. Migunova, E. S. Lesnaya tipologiya i botanika. Ekologicheskaya ocenka faktorov prirodnoj sredy / E.S. Migunova // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. – 2020. – T. 24, № 4. – S. 65-81. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-4-65-81>.
6. Isuscheva, T. A. Formovoe raznoobrazie *Corylus avellana* L. (leschiny obiknovennoi) po kachestvu plodov v Respublike Adigeya : specialnost 06.01.05 «Selekciya i semenovodstvo selskohozyaistvennykh rastenii» : avtoref. dis. ... kand. s-h. nauk / Isuscheva Tatyana Anatolevna ; Maikopskii gos. tehn. un-t. – Maikop, 2014. – 22 s.



7. Pogoda i klimat Voroneja. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (data obrascheniya 13.11.2023 g.)
8. Pchihachev, E. K. Osobennosti vesennei vegetacii listev leschiny v usloviyah predgorii Respub. liki Adigeja / E. K. Pchihachev, T. A. Isuscheva // *Novie tehnologii*. 2020. T. 16- № 6. S. 79-88. Rezhim dostupa: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44883800>
9. Rosgidromet. – URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/28963/> (data obrascheniya 13.11.2023 g.)
10. Slavskiy, V.A. Izuchenie bioraznoobraziya i ocenka sostoyaniya leshchiny obyknovnoy v Voronezh-skoj oblasti / V. A. Slavskiy, T. S. Nakonechnaya, E. V. Titov, Z. Govedar // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. – 2022. – T. 12. – № 3 (47). – S. 51–61. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.3/5
11. Slavskiy, V. A. Prognoz rasshireniya granic ploshchadej, prigodnyh dlya sozdaniya orekha greckogo v Voronezhskoj oblasti. / *Lesotekhnicheskij zhurnal*. – 2018. – № 4 (32). – T. 8. – S. 129-136. DOI: 10.12737/article\_5c1a321c2832e4.03254814
12. Shevelina, I. V., Nureyev D. N. Statisticheskaya obrabotka lesovodstvenno-taksatsionnoy informatsii v srede STATISTICA [Statistical processing of forestry and taxation information in the STATISTICA environment]. Yekaterinburg: UGLTU, 2022. - 112 p. ISBN 978-5-94984-840-1 Rezhim dostupa: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777>
13. Ascari, L. Relationships between yield and pollen concentrations in Chilean hazelnut orchards. 2020, 115, 126036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126036>
14. Harold, Arias-Leclaire Role of seed size, phenology, oogenesis and host distribution in the specificity and genetic structure of seed weevils (*Curculio* spp.) in mixed forests / Arias-Leclaire Harold, R. Bonal, García-López Daniel, M. Espelta Josep // *Integr Zool*. 2018, 13(3). P. 267-279. DOI: <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12293>
15. Bo Y. Extraction, identification, and quantification of antioxidant phenolics from hazelnut (*Corylus avellana* L.) shells / Y. Bo, L. Mei, Kent M. Eskridge, Loren D. Isom, Milford A. Hanna // 2018, 244, Pages 7-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.116>
16. Bregaglio ,S. et al. The HADES Yield prediction system – A case study on the Turkish hazelnut sector. 2021, 12. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.665471>
17. Cerulli A. Metabolite profiling of “green” extracts of *Corylus avellana* leaves by 1H NMR spectroscopy and multivariate statistical analysis / A. Cerulli, M. Masullo, P. Montoro et al // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2018, 160, Pages 168–178. DOI: [doi.org/10.1016/j.jpba.2018.07.046](https://doi.org/10.1016/j.jpba.2018.07.046).
18. Öunapuu-Pikas, E. Plasticity and light sensitivity of leaf hydraulic conductance to fast changes in irradiance in common hazel (*Corylus avellana* L.) / E. Öunapuu-Pikas, A. Sellin // *Plant Science*. 2020, 290. DOI: [doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110299](https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110299).
19. Slavskiy, V. Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain / V. Slavskiy, D. Litovchenko, S. Matveev, S. Sheshnitsan, M. Larionov // *Land*. 2023, 12, 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12010103>.
20. Slavskiy, V.A A comprehensive assessment of the sustainability of nuts of the genus *Juglans* on adaptive features in the Voronezh region / V. A. Slavskiy, A. N. Vodolazhsky, S. G. Biganova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Jubilee Scientific and Practical Conference "Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)"*. 2019. P. 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012007.
21. Slavskiy, V.A. Assessment of economically valuable forms of fruit of the genus *Juglans* for the creation of forest crops in the Voronezh region / *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International scientific and practical conference "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions" (Forestry-2019)*. 2019. P. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/392/1/012007.
22. Slavskiy V. The impact of changes in climatic conditions on the dynamics of the phenology of species of nuts of the genus *Juglans* in the Voronezh region (Russia) / V. Slavskiy, S. Horbachenko // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions"*. 2020. P. 012049. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012049.

23. Validation of a high-throughput method for the accurate quantification of secondary products of lipid oxidation in high-quality hazelnuts (*Corylus avellana* L.) / S. Squara, A. Caratti, F. Ortega Gavilan, P. Bolzoni, N. Spigolon, G. Genova, G. Castello, M. Gracia Ba-gur González, L. Cuadros-Rodriguez, C. Bicchi, C. Cordero // A robust tool for quality assessment. 2022. 114, P. 104766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104766>

24. Phenological growth stages of ‘Barcelona’ hazelnut (*Corylus avellana* L.) described using an extended BBCH scale / A. Paradinas, L. Ramade, C. Mulot-Greffeuille, R. Hamidi, T. Maud, J. Toillon // 2022, 296, 110902 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110902>

### Сведения об авторе

✉ *Наконецкая Татьяна Сергеевна* – аспирант кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация; 394087, e-mail: [ryadnova.1997@mail.ru](mailto:ryadnova.1997@mail.ru)

### Information about the author

✉ *Tatiana S. Nakonechnaya* – postgraduate student of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Inventory, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation; 394087, e-mail: [ryadnova.1997@mail.ru](mailto:ryadnova.1997@mail.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/7>

УДК 635.921\*635-154



## Опыт выращивания посадочного материала *Thuja occidentalis* 'Smaragd' с ЗКС по технологии «Контейнер в контейнере»

Валентина Т. Попова, bot-fiz.rast@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3765-7164>

Алексей Н. Цепляев , abies@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1938-5660>

Анна А. Попова, logachevaa@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4711-5377>

Анастасия В. Пальцева, nastya\_dy@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3309-8170>

Петр М. Евлаков, peter.evlakov@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0003-0138-2410>

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

В российском питомниководстве существуют определенные стандарты на посадочный материал, разработанные для всех видов растений и диктующие четкие требования к продукции питомника, при отклонении от которых, снижается конкурентоспособность питомника на рынке растений. Для того, чтобы выращивать здоровый посадочный материал, соответствующий всем требуемым нормативам, необходимо применять современные технологии, обеспечивающие все условия для равномерного развития надземной и подземной частей растения, отсутствия признаков поражения болезнями. В этой статье рассмотрен опыт по выращиванию посадочного материала *Thuja occidentalis* 'Smaragd' с закрытой корневой системой в контейнерах. Произведены наблюдения за состоянием 180 контейнеризированных саженцев на заложенных в питомнике трёх опытных площадках – открытой, затененной и площадкой по технологии «Контейнер в контейнере». Проанализированы замеры температуры субстрата в контейнерах на протяжении дня, биометрические показатели саженцев – высота растения, диаметр корневой шейки, длина и плотность корней. Показаны все преимущества и недостатки системы «Контейнер в контейнере», отличия от классического выращивания саженцев в контейнерах, а также, определено влияние данного метода на физиологию и продуктивность растений.

**Ключевые слова:** Контейнерное выращивание, посадочный материал, *Thuja occidentalis*, питомниководство, «Pot-in-pot», закрытая корневая система, температура субстрата.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 1023013000020-6-4.1.2 «Отбор хозяйственно ценных и устойчивых к изменению климата древесных культур, отличающихся высокой биологической продуктивностью и потенциалом секвестрации углерода с учетом региональных почвенно-климатическим особенностей для реализации лесоклиматических проектов (FZUR-2023-0002)».


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

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


**Для цитирования:** Опыт выращивания посадочного материала *Thuja occidentalis* 'Smaragd' с ЗКС по технологии «Контейнер в контейнере» / В. Т. Попова, А. Н. Цепляев, А. А. Попова, А. В. Пальцева, П. М. Евлаков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 87–101. – Библиогр.: с. 97–100 (20 назв.) – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/7>.


**Поступила:** 02.11.2023. **Пересмотрена:** 17.11.2023. **Принята:** 18.11.2023. **Опубликована онлайн:** 30.11.2023.

## The experience of growing the planting material of the *Thuja occidentalis* 'Smaragd' with a closed root system using "Pot-in-pot" technology

Valentina T. Popova<sup>1</sup>, bot-fiz.rast@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3765-7164>

Alexey N. Tseplyaev<sup>1</sup>,  abies@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1938-5660>

Anna A. Popova<sup>1</sup>, logachevaaa@rambler.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4711-5377>

Anastasia V. Paltceva<sup>1</sup>, nastya\_dy@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0007-3309-8170>

Peter M. Evlakov<sup>1</sup>, peter.evlakov@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0003-0138-2410>

<sup>1</sup>FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation

### Abstract

In the Russian nursery industry, there are certain standards for planting material developed for all types of plants that dictating clear requirements for nursery products, in case of deviation from which, the competitiveness of the nursery in the plant market decreases. In order to grow healthy planting material that meets all the required standards, it is necessary to apply modern cultivation technologies that provide all the conditions for the uniform development of the aboveground and underground parts of the plant, without any disease. This article discusses the experience of growing *Thuja occidentalis* 'Smaragd' planting material with a closed root system in containers. Observations on the condition of 180 containerized seedlings on three experimental sites in the nursery - an open area, a shaded area and a "Pot-in-pot" technology area were made. Measurements of substrate temperature in containers throughout the day, biometric indicators of seedlings – plant height, root neck diameter, root length and density were analyzed. All the advantages and disadvantages of the "Pot-in-pot" system, differences from the classical cultivation are shown, and the influence of this method on the physiology and productivity of plants is determined.

**Keywords:** Container cultivation, planting material, nursery, "Pot-in-pot", closed root system, substrate temperature.

**Funding:** The study was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 1023013000020-6-4.1.2 "Selection of economically valuable and resistant to climate change forest crops, characterized by high biological productivity and carbon sequestration potential, taking into account regional soil and climatic characteristics for the implementation of forest climate projects (FZUR-2023-0002)").

**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:** Popova V. T., Tseplyaev A. N., Popova A. A., Paltseva A. V., Evlakov P. M. (2023). Experience of growing *Thuja occidentalis* 'Smaragd' planting material with a closed root system using the "Pot-in-pot" technology. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 87-101. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/7>.

**Received** 02.11.2023. **Revised** 17.11.2023. **Accepted:** 18.11.2023. **Published online:** 30.11.2023.

### Введение

В настоящее время выращивание посадочного материала в пластиковых контейнерах – ведущий тренд современного питомниководства. Контейнеры разных форм и размеров позволяют полу-

чать здоровые однолетние и многолетние растения в промышленных масштабах.

Выращивание саженцев с ЗКС практикуется с 50-х годов XX века в ряде стран мира, оно с успе-

хом используется в странах Европы, США [10]. Лидерство в производстве посадочного материала с ЗКС принадлежит Скандинавским странам [1].

Ряд работ, посвященных оценке влияния факторов на эколого-физиологические особенности роста и развития растений, в частности, света [3], температуры, влажности [19], состава субстрата [8, 11, 13] и применения удобрений [18], размера контейнера [16, 17], качества поливной воды [5], заложили научные основы технология выращивания саженцев с закрытой корневой системой [9, 15].

Контейнерное выращивание посадочного материала обладает рядом преимуществ перед грунтовым: возможность реализации и посадки растений в течение всего вегетативного периода, меньший вес растений, оптимизирующий логистику [14], снижение трудозатрат на выкопке, экономия рабочих ресурсов и удобрений, сохранение почвы, снижение вредного воздействия на окружающую среду. Для организации питомников в регионах с бедной неплодородной почвой - контейнерное выращивание является доступным и перспективным методом получения качественного посадочного материала. Этот высокоэффективный метод способствует пересадке растений со 100 %-ной приживаемостью, а в регионах с теплыми зимами позволяет осуществлять посадку растений круглый год.

Однако, наравне с преимуществами у данного метода есть и недостатки: быстрое истощение субстрата и связанная с этим необходимость применения дорогостоящих удобрений пролонгированного действия [2], необходимость своевременной пересадки растений в контейнер большего объема [7], интенсивное пересыхание торфяного субстрата в регионах с жарким климатом, ингибирование ростовых процессов вследствие воздействия высоких летних температур.

Чтобы снизить негативное воздействие перегрева субстрата, в конце восьмидесятых годов XX века в США разработали технологию (Pot-in-pot) «Контейнер в контейнере». Метод «Pot-in-pot» сочетает в себе преимущества и контейнерного и грунтового выращивания растений.

В основе технологии лежит принцип, при котором растения выращиваются в продукционных

контейнерах («production pot») (горшок-вставка), которые устанавливаются в другие контейнеры («socket pot») (горшок-гнездо), вкопанные в почву. Контейнеры подбираются таким образом, чтобы между стенками оставался небольшой зазор. Таким образом решается ряд проблем: перегрев и пересушивание субстрата, ветровал, повреждение морозами. Проблема данной технологии заключается в высокой первоначальной стоимости и необходимости периодической замены агроткани, поврежденной из-за механических нагрузок и воздействия ультрафиолета, а также необходимость регулярной обработки площадки от сорных растений, прорастающих через агроткань. При правильной эксплуатации данная площадка может прослужить несколько десятилетий.

Технология «Контейнер в контейнере» (Pot-in-pot)<sup>2</sup> получил распространение в питомниках США, европейских стран, а также в отдельных хозяйствах России, в связи с подтверждением высокой эффективности [12,20] и экономической обоснованностью [4, 6].

Объем контейнеров для выращивания саженцев по данной технологии варьирует в зависимости от возраста и вида растений. Наибольшее распространение получили емкости объемом от 68 л и до 114 л. Межвидовые и межродовые биологические особенности древесных и кустарниковых культур не позволяют применять единую агротехнику выращивания, поэтому необходимо уточнение технологии выращивания для посадочного материала разных родов. Целью исследования явилось изучение особенностей роста саженцев *Thuja occidentalis*, выращенных по технологии «Контейнер в контейнере».

### Материалы и методы

#### Объект исследования

Эксперименты были проведены на 2-летних саженцах *Thuja occidentalis* 'Smaragd', полученных путем размножения зеленым черенкованием, и пересаженных в 3-литровые контейнеры из горшка Р9.

<sup>2</sup> Легенчук, Н. Н. Организация питомника с применением методики Pot-in-pot / Н. Н. Легенчук. Москва: АППМ, 2019. С. 56-71. URL: <https://www.ruspitomniki.ru/article/index.html/id/2079>.

### Дизайн эксперимента

Эксперимент проводился в питомнике ООО «Объединенные питомники», где данная технология успешно применяется с 2009 года. Было заложено 3 экспериментальных контейнерных площадки, с различными режимами освещенности и экспозиции технологических горшков.

Контрольная площадка, на которой контейнеры с саженцами располагались на поверхности почвы (солнечное освещение - 100%; уклоном 2-5° в сторону дренажной канавы). На ровную поверхность почв был добавлен песчаный слой (10-15 см). Слой песка накрывали черной агротканью, (Polyweave black, Польша), закрепляли металлическими шпильками. Полив площадки автоматиче-

ский, контролируемый с помощью автоматических подвесных дождевателей (миниспринклеры (MS1101A)). Площадка поливалась 2-3 раза в сутки.

На второй площадке подготовка основания велась по примеру контрольного полигона, но на ней был 1) установлен навес из затеняющей сетки, с 50 %-й степенью защиты от солнечной радиации, закрепленной на металлических П-образных опорах с горизонтальными перекладинами.

На третьем полигоне выращивание саженцев *Thuja occidentalis* 'Smaragd' проводилось при помощи технологии «Контейнер в контейнере», устройство которой представлено на рис. 1.

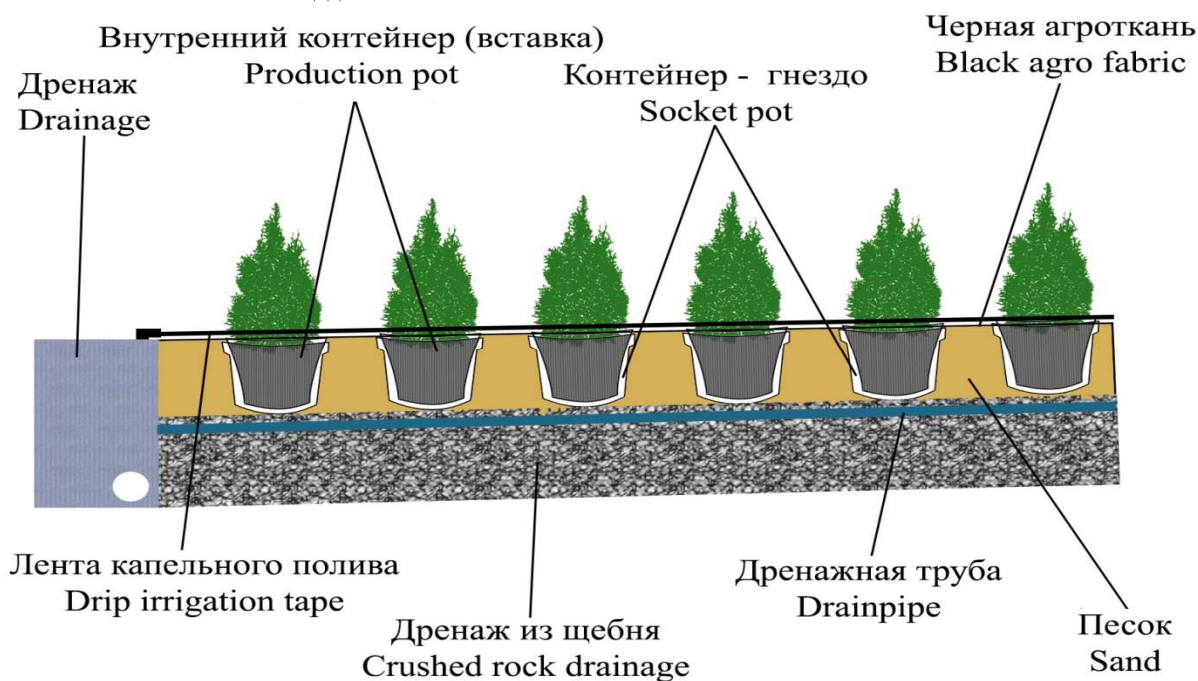


Рисунок 1. Схематическое изображение опытной площадки «Контейнер в контейнере» в разрезе

Figure 1. Schematic representation of the experimental area of "Pot-in-pot" in the section

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Контейнеры наполняли субстратом, представляющим собой смесь низинного торфа и субстрата. Состав субстрата был одинаков для всех опытных площадок.

Ход роста саженцев *Thuja occidentalis* 'Smaragd' и состояние их корневой системы оценивали на протяжении двух лет, без пересадки в контейнеры большего объема. На каждой площадке по

60 контейнеров. Производились измерения температуры субстрата в контейнерах, замеры биометрических показателей растений общепринятыми методами. Для получения более показательных данных о состоянии корней у растений на опытных площадках, был проведен анализ проекций корневого кома растения на стороны света, с учетом температуры субстрата. Подсчет полей зрения прово-

## Природопользование

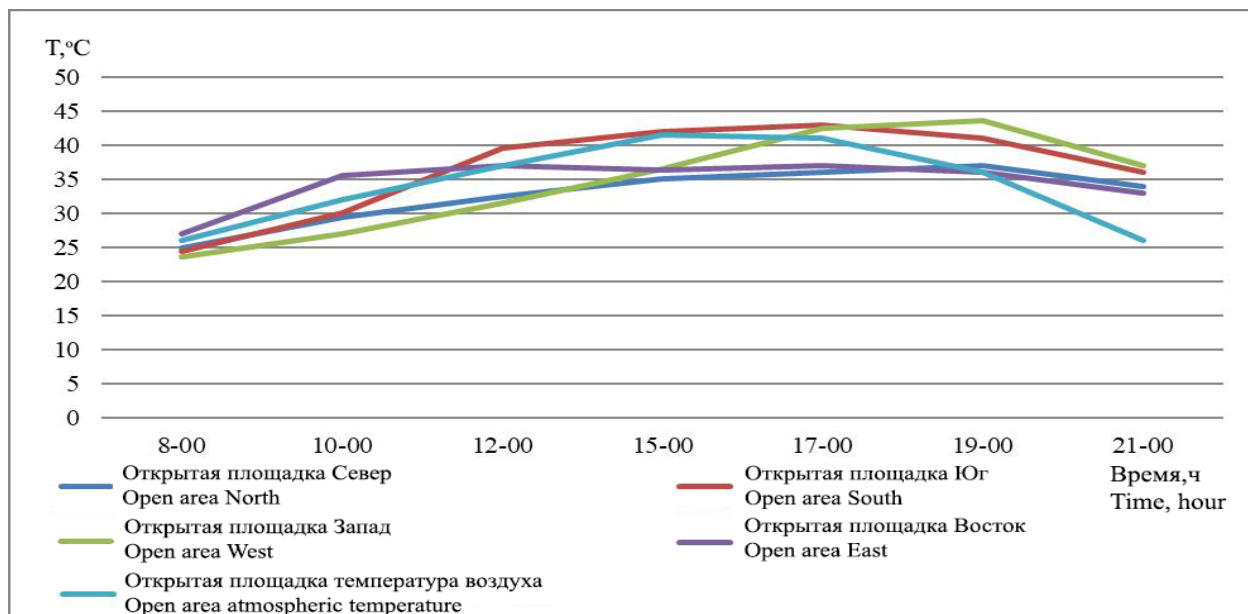
дился при наложении сетки 1x1см на фотографии корневого кома, приведенные к одному масштабу, с подсчетом длины корней отдельно по ячейкам. Сумма всех ячеек показывала общую длину корней в каждом из вариантов технологии.

### Анализ данных

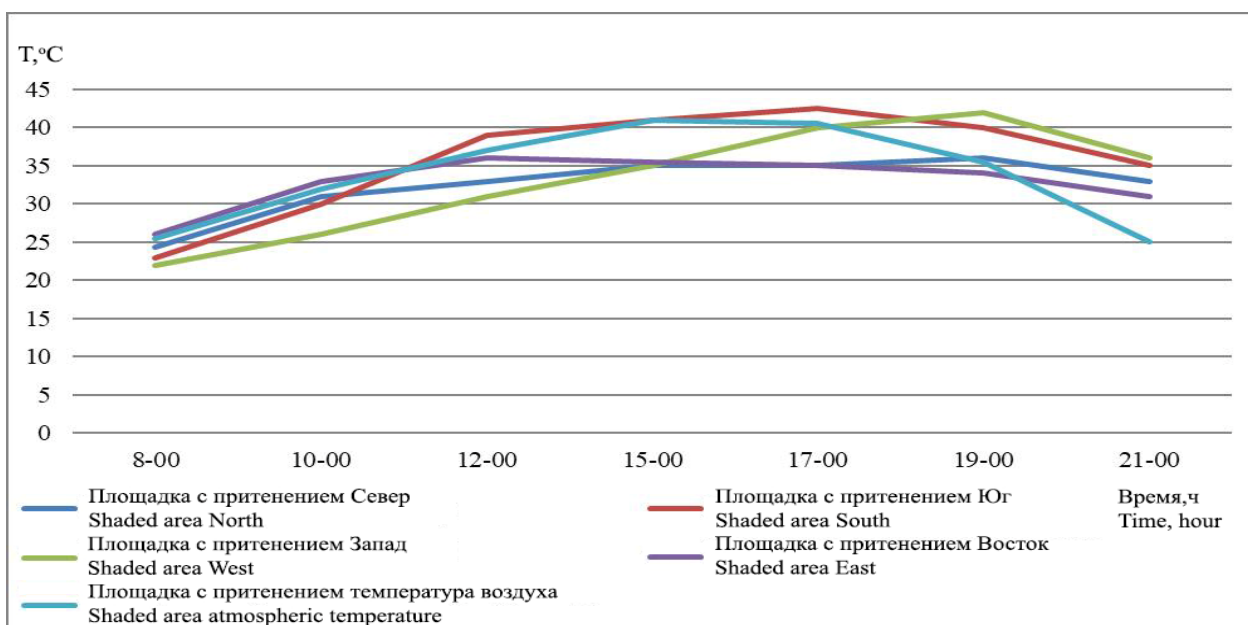
Статистическую обработку, в том числе дисперсионный анализ результатов, проводили с использованием компьютерных программ Statistica 10.0, Excel.

### Результаты и обсуждение

Результаты измерения температур субстратов в контейнерах на 3-х опытных площадках показали, что на открытой площадке средняя температура субстрата в жаркий летний день составляет 34,5°C, под затеняющей сеткой - 34,2°C. Средняя температура субстрата на площадке «КвК» - 29,1°C, что ниже контрольных измерений на 5,4°C. Температурная динамика субстрата на протяжении дня отражена на графике (рис. 2).



а



б



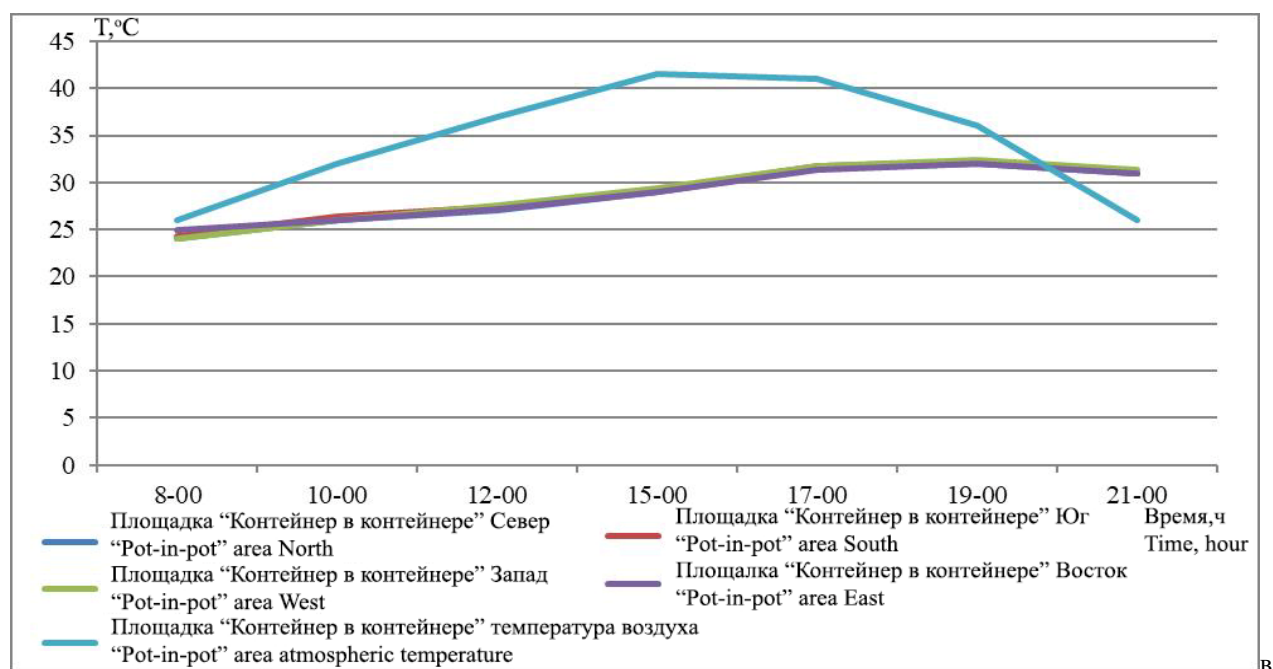


Рисунок 2. Изменение температуры субстрата на протяжении жаркого дня в летний период: а) контрольная площадка; б) площадка с затеняющей сеткой; в) площадка «Контейнер в контейнере»  
 Figure 2. The change of the substrate temperature during the average day in summer: a) control area; б) shaded area; в) "Pot-in-pot" area

Источник: собственная композиция авторов  
 Source: author's composition

*Расчет показывает:*

1) В течение модельного летнего дня температура субстрата в контейнерах, экспонированных по сравниваемым технологиям, в зависимости от освещенности и типа контейнера составляет от 3 до 8 °С.

2) Самая высокая интенсивность нагрева зарегистрирована в восточной части контейнеров, расположенных на площадке без затенения: к 10-00 температура субстрата достигает 35°С. К 17-00 отмечается снижение температуры субстрата с восточной стороны до 33°С и повышение температуры с южной и западной сторон контейнера до 43°С.

3) На площадке с затеняющей сеткой температура субстрата в контейнерах демонстрирует схожую динамику, что и на открытой площадке субстрат нагревается с 25°С до 42°С с 8-00 до 15-00. Такое повышение температуры негативно влияет на состояние корневой системы, вызывая инактивацию и денатурацию белков метаболических пу-

тей в клетках растений. Достоверных различий между средними температурами субстратов в контрольном варианте и на площадке с затенением не выявлено, таким образом затеняющая сетка не предотвращает перегрев субстрата, снижается температура самого контейнера.

4) Для варианта по технологии «КвК» зафиксирована стабильная температура субстрата на протяжении всего модельного дня, что благоприятствует росту и развитию корневой системы. С 8-00 до 15-00 ч температура субстрата поднимается с 25°С до 30°С равномерно со всех сторон контейнера, но не превышают критический показатель 35°С, что является оптимальным температурным режимом для растений.

Показатели биометрических измерений саженцев *Thuja occidentalis 'Smaragd'* в течение двух вегетационных периодов представлены в табл. 1.



Биометрические характеристики *Thuja occidentalis* 'Smaragd', в зависимости от локации

Table 1

Biometric characteristics of *Thuja occidentalis* 'Smaragd', depending on location

Варианты опыта   Experimental variants	Высота, см   Height, cm		Диаметр у корневой шейки, мм   Root neck diameter, mm		Показатель силы ( $\eta^2$ ) влияния фактора «Температура»   Effect size ( $\eta^2$ ) «Temperature» factor	
	M $\pm$ m <sub>M</sub>	Cv, %	M $\pm$ m <sub>M</sub>	Cv, %	на рост в высоту   for growth in height	на рост в диаметре   for growth in diameter
3 года   3 years						
Контроль (открытая площадка)   Control (open area)	24,9 $\pm$ 0,8	11,5	11,0 $\pm$ 0,3	1,1	$\eta^2_{\text{От-КвК}}=0,86$   $\eta^2_{\text{Op-PinP}}=0,86$	$\eta^2_{\text{От-КвК}}=0,81$   $\eta^2_{\text{Op-PinP}}=0,81$
С затеняющей сеткой   Shaded area	32,6 $\pm$ 0,9	4,3	11,5 $\pm$ 0,2	0,6	$\eta^2_{\text{От-3}}=0,52$   $\eta^2_{\text{Op-Cl}}=0,52$	$\eta^2_{\text{От-3}}=0,55$   $\eta^2_{\text{Op-Cl}}=0,55$
По технологии КвК   «Pot-in-pot» area	39,6 $\pm$ 0,4	15,3	13,1 $\pm$ 0,2	6,1	$\eta^2_{\text{КвК-3}}=0,62$   $\eta^2_{\text{PinP-Cl}}=0,62$	$\eta^2_{\text{КвК-3}}=0,26$   $\eta^2_{\text{PinP-Cl}}=0,26$
НСР <sub>0,05</sub>	4,5		0,9			
4 года   4 years						
Контроль (открытая площадка)   Control (open area)	50,1 $\pm$ 1,0	8	15,4 $\pm$ 0,2	5,9	$\eta^2_{\text{От-КвК}}=0,85$   $\eta^2_{\text{Op-PinP}}=0,85$	$\eta^2_{\text{От-КвК}}=0,87$   $\eta^2_{\text{Op-PinP}}=0,87$
С затеняющей сеткой   Shaded area	61,2 $\pm$ 1,6	8,9	18,5 $\pm$ 0,3	6	$\eta^2_{\text{От-3}}=0,59$   $\eta^2_{\text{Op-Cl}}=0,59$	$\eta^2_{\text{От-3}}=0,71$   $\eta^2_{\text{Op-Cl}}=0,71$
По технологии КвК   «Pot-in-pot» area	76,5 $\pm$ 1,6	8,3	20,2 $\pm$ 0,2	4,4	$\eta^2_{\text{КвК-3}}=0,76$   $\eta^2_{\text{PinP-Cl}}=0,76$	$\eta^2_{\text{КвК-3}}=0,69$   $\eta^2_{\text{PinP-Cl}}=0,69$
НСР <sub>0,05</sub>	8,08		1,5			

Примечание: НСР<sub>0,05</sub> - Наименьшая существенная разность, М - Среднее, m<sub>M</sub> – Ошибка среднего, Cv – коэффициент вариации.

Note: НСР<sub>0,05</sub>-Least significant difference, M-Medium, m<sub>M</sub>-Medium error, Cv-Coefficient of variation.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Результаты измерений высоты и диаметра корневой шейки у саженцев *Thuja occidentalis* 'Smaragd' показывают, что:

1) высота трехлетних растений, выращиваемых один сезон на площадке с затеняющей сеткой больше контрольного показателя на 30,9 %. Различия достоверны при 5% уровне значимости. Диаметр корневой шейки у саженцев, выращиваемых с применением превышают контроль на 0,5 мм,

(11,8 %). Различия не достоверны, разница между вариантами  $d = 0,5 < \text{НСР}_{0,05} = 0,9$

2) высота четырехлетних растений на площадке с затеняющей сеткой больше контрольного показателя на 11,1 см, что составляет 22,2 %; по диаметру корневой шейки - 3,3 мм (21,4 % от контроля). Различия достоверны в обоих случаях.

3) высота трехлетних саженцев на площадке «КвК» больше контрольного показателя на 59 %, а

корневая шейка больше контрольного показателя по диаметру на 2,1 мм (19,1 %). Достоверность различий подтверждена на уровне 95%:  $d_{\text{высота}} = 14,7 < \text{НСР}_{0,05} = 4,5$

4) высота четырехлетних растений на площадке «КвК» больше контроля на 26,4 см, составляющих 52 %, а показатель диаметра корневой шейки превышает контрольный на 4,8 мм (31,2 %).

В первый год выращивания растения в КвК по высоте и диаметру достоверно доминировали над аналогичными, растущими под притеночным навесом  $d_{\text{высота}} = 7 > \text{НСР}_{0,05} = 0,9$ ,  $d_{\text{диаметр}} = 1,6 > \text{НСР}_{0,05} = 0,9$ . На второй год различия также достоверны превышение также было в пользу технологии КвК  $d_{\text{высота}} = 15,3 > \text{НСР}_{0,05} = 8,08$ ,  $d_{\text{диаметр}} = 1,7 > \text{НСР}_{0,05} = 1,5$ .

При сравнении показателей можно утверждать, что сила влияния температуры на рост рас-

тений по высоте является значительной ( $\eta^2 x = 0,62 - 0,86$ ), на рост растений по диаметру влияние указанного фактора ниже, но диапазон варьирования значительно шире ( $\eta^2 x = 0,26 - 0,81$ ).

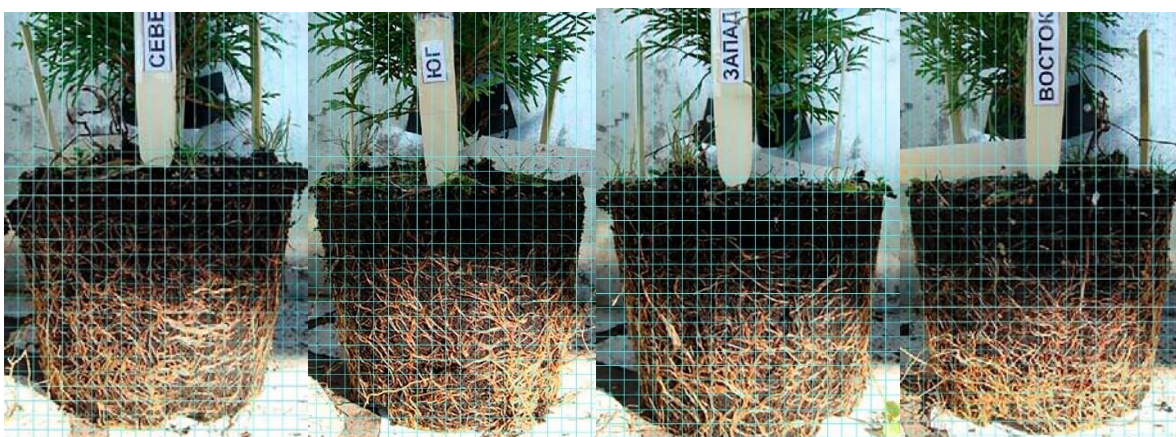
Таким образом, можно утверждать, что наиболее оптимальная для развития корневой системы температура субстрата в горшке наблюдалась на площадке «Контейнер в контейнере», а посадочный материал отличался более высокой скоростью роста, что показало наличие закономерной связи между продуктивностью растений и температурой субстрата в контейнере.

На фотографиях, представленных на рисунке 3, хорошо прослеживается закономерность распределения корней и их плотность, в зоне прилегания корней к контейнеру.

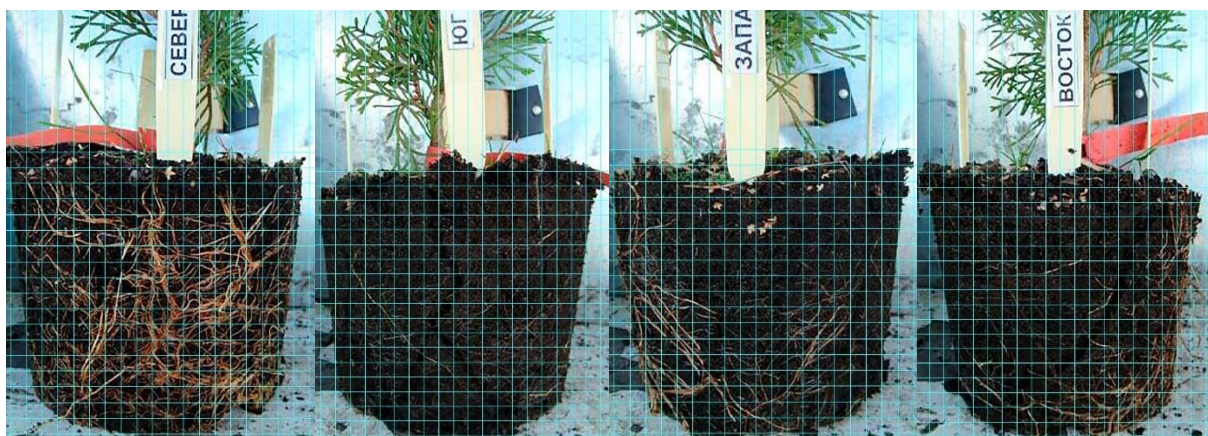
Протяженность корневой системы по каждой из сторон света, показана в табл. 2.



а



б



В

Рисунок 3. Фотографии корневого кома *Thuja occidentalis* 'Smaragd', приведенные к натуральным размерам, с наложением сетки 1х1 см, для подсчета протяженности корневой системы в зависимости от ориентации по сторонам света: а) контрольная площадка (Север, Юг, Запад, Восток); б) «Контейнер в контейнере» (Север, Юг, Запад, Восток); в) площадка с затеняющей сеткой (Север, Юг, Запад, Восток)

Figure 3. Root pictures of *Thuja occidentalis* 'Smaragd', reduced to natural size, with a 1x1 cm grid overlay, for calculating the length of the root system depending on the orientation to the cardinal directions: a) control area (North, South, West, East); b) "Pot-in-pot" area (North, South, West, East) c) shaded area (North, South, West, East)

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Таблица 2

Биометрия корневых систем *Thuja occidentalis* 'Smaragd' и влияние фактора «Сторона света»

Table 2

Biometrics of root systems *Thuja occidentalis* 'Smaragd' and effect size ( $\eta^2$ ) the cardinal direction» factor

Варианты опыта   Experimental variants	Длина корней средняя, см   Average root length, cm		Длина корней, см   Root length, cm		Влияние фактора «Сторона света»   Effect size ( $\eta^2$ ) «The cardinal direction» factor
	M $\pm$ m <sub>M</sub> , см	Cv, %	Минимум, см   Minimum, cm	Максимум, см   Maximum, cm	
Север   North					
Контроль (открытая площадка)   Control (open area)	402,6 $\pm$ 10,3	9,9	442,6	464	$\eta^2_{От-КвК}=0,61$   $\eta^2_{Op-PinP}=0,61$
По технологии КвК   «Pot-in-pot» area	514 $\pm$ 13,2	10	434	592	$\eta^2_{От-3}=0,04$   $\eta^2_{Op-Cl}=0,04$
С затеняющей сеткой   Shaded area	389,4 $\pm$ 8,8	8,8	335	439	$\eta^2_{КвК-3}=0,65$   $\eta^2_{PinP-Cl}=0,65$
НСР <sub>0,05</sub>	30,9				
Юг   South					
Контроль (открытая площадка)   Control (open area)	116,5 $\pm$ 2,9	9,6	99,5	134,6	$\eta^2_{От-КвК}=0,97$   $\eta^2_{Op-PinP}=0,97$
По технологии КвК	430,4 $\pm$ 11,7	9,9	367	496,5	$\eta^2_{От-3}=0,04$



## Природопользование

Варианты опыта   Experimental variants	Длина корней средняя, см   Average root length, cm		Длина корней, см   Root length, cm		Влияние фактора «Сто- рона света»   Effect size ( $\eta^2$ ) «The cardinal direc- tion» factor
	$M \pm m_m, \text{cm}$	$Cv, \%$	Минимум, см   Minimum, cm	Максимум, см   Maximum, cm	
«Pot-in-pot» area					$\eta^2_{Op-Cl}=0,04$
С затеняющей сет- кой   Shaded area	121,1 $\pm$ 3,4	11,2	103,7	143	$\eta^2_{КвК-3}=0,96$   $\eta^2_{PinP-Cl}=0,96$
НСР <sub>0,05</sub>	19,2				
Запад   West					
Контроль (открытая площадка)   Control (open area)	136,8 $\pm$ 3,3	9,5	116	155	$\eta^2_{От-КвК}=0,95$   $\eta^2_{Op-PinP}=0,95$
По технологии КвК   «Pot-in-pot» area	418,9 $\pm$ 10,9	10,1	356	483	$\eta^2_{От-3}=0,29$   $\eta^2_{Op-Cl}=0,29$
С затеняющей сет- кой   Shaded area	154,6 $\pm$ 4,1	4,2	128	179	$\eta^2_{КвК-3}=0,95$   $\eta^2_{PinP-Cl}=0,95$
НСР <sub>0,05</sub>	19,8				
Восток   East					
Контроль (открытая площадка)   Control (open area)	176,7 $\pm$ 4,4	9,8	149,6	204	$\eta^2_{От-КвК}=0,98$   $\eta^2_{Op-PinP}=0,98$
По технологии КвК   «Pot-in-pot» area	461,9 $\pm$ 11,9	10	392,7	531,3	$\eta^2_{От-3}=0,35$   $\eta^2_{Op-Cl}=0,35$
С затеняющей сет- кой   Shaded area	214,6 $\pm$ 8,6	15,6	146,6	253	$\eta^2_{КвК-3}=0,92$   $\eta^2_{PinP-Cl}=0,92$
НСР <sub>0,05</sub>	24,8				

Примечание: НСР<sub>0,05</sub> - Наименьшая существенная разность, М - Среднее, m<sub>м</sub> – Ошибка среднего, Cv – коэффициент вариации.

Note: НСР<sub>0,05</sub> - Least significant difference, M - Medium, m<sub>м</sub> - Medium error, Cv - Coefficient of variation.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Основная масса корней располагается на периферии корневого кома, примыкая к стенкам контейнера или в непосредственной близости.

В условиях открытой площадки без притенения растения подвергались воздействию прямой солнечной радиации, приводящего к перегреву южной и западной частей корневой зоны, и, вследствие этого, угнетению ростовых процессов корневой системы. При этом с северной и восточной сто-

рон интенсивность роста корневой системы сохранялась, так как в меньшей степени была подвержена перегреву.

Результаты опыта, в условиях опытной площадки с затенением, показывают, что корни растений по плотности и распределению сходны с контролем. Достоверность различий показана только для восточной стороны.

Наибольшая однородность распределения корней по всей поверхности кома наблюдается в системе «КвК». Длина корней практически одинакова с каждой из сторон света: с юга общая длина корней составляет  $-430,4+11,7$  см, с запада –  $418,6+10,9$  см, с севера –  $514+13,2$ , с востока  $461+11,9$  см.

Разница в протяженности корней, при сравнении открытой, притененной площадок и площадки «КвК» достигает - 2,1-2,4 раза.

Сила влияния фактора «Страна света» показывает зависимость протяженности корней от способов выращивания. Сила влияния составляет 61-65 % с севера; с юга, запада и востока - 92-97%, при сравнении длины корней саженцев, выращенных по методу «КвК», с саженцами на открытой площадке и площадке с затеняющей сеткой.

Благодаря технологии «Контейнер в контейнере» растение формирует корневую систему, равномерно распределенную по всей поверхности корневого кома, с большим количеством мелких корней и множеством активных точек роста, что чрезвычайно важно для успешной пересадки и дальнейшего роста.

Фактор «Страна света», как фактор влияния нагрева субстрата, снижается от контроля (максимум влияния) к методу «КвК» (минимум влияния). Это позволяет использовать технологию «КвК» для устранения негативного воздействия высоких температур, получения у саженцев равномерно развитой и устойчивой корневой системы, являющейся залогом для дальнейшего роста растений и их закрепления в почве.

Система «КвК» рекомендуется к внедрению в производство посадочного материала туи западной.

### Заключение

Контейнеризированные саженцы *Thuja occidentalis* 'Smaragd', выращенные из черенков по методу «КвК», превосходят в скорости роста надземной части и в равномерности формирования корневой системы остальные растения, выращенные на открытой площадке и под затеняющей сеткой. Это является прямым следствием нейтрализации термического воздействия на субстрат, обеспечиваемой данной технологией.

### Список литературы

1. Бобушкина, С. В. Практика выращивания лесного посадочного материала с закрытой корневой системой применительно к тепличным комплексам Архангельской области/ С.В. Бобушкина, А.О. Сеньков, Д.Х. Файзулин// ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» Россия, Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3, № 4 - 16 с. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-16. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/drmuyp>.
2. Божидай, Т. Н. Влияние удобрения Vasacote на рост и развитие *Vaccinium corymbosum* L / Т. Н. Божидай. – Текст: непосредственный // Субтропическое и декоративное садоводство. – 2020. – № 73. – С. 168-173. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43811716>
3. Жигулин, Е. В. Влияние освещенности на рост сеянцев с закрытой корневой системой / Е. В. Жигулин, А. С. Оплетаяев // Международный научно-исследовательский журнал № 11 (113) Ч.1 – 2021 - С. 124-128 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.113.11.022>
4. Цепляев, А. Н. Технология pot-in-pot. Теория и практика в производственном питомнике / А. Н. Цепляев // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 20 декабря 2018 года. – Красноярск: ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2019. – С. 331-333. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/ZCNYT>.
5. Носников В. В., Селищева О. А. Качественные характеристики поливной воды и их влияние на технологические аспекты выращивания посадочного материала хвойных пород с закрытой корневой системой // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (240). С. 81–87. Режим доступа: <https://elibrary.ru/tdrfrs>.

6. Панявина, Е. А. Экономическая оценка инновационной технологии «Pot-in-Pot» для целей лесовосстановления / Е. А. Панявина, С. С. Морковина, А. Н. Цепляев // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10. – № 3 (39). – С. 185–196. – Библиогр.: с. 193–195. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/18
7. Проворченко, А.В. Структура корневой системы растений можжевельника скального и туи западной при выращивании в контейнерах/ А.В. Проворченко, Каменских Л.А.// Субтропическое и декоративное садоводство. - 2022. - № 80. - С. 96-103. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48315907>.
8. Раджабов, А.К. Изменение элементов плодородия различных субстратов в зависимости от их состава при выращивании саженцев яблони с ЗКС / А.К. Раджабов, А.А. Никитенко, В.М. Лапушкин, В.Д. Стрелец// Известия ТСХА, вып. 4 – 2020 – С.18-31. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/ubbuzn>.
9. Смышляева М.И. Выращивание сеянцев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) с закрытой корневой системой для создания лесных культур в зоне хвойно-широколиственных лесов Среднего Поволжья: диссертация на соискание ученой степени кандидата Сельскохозяйственных наук: 06.03.01 / М.И. Смышляева; ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»], 2018.- 139 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/svxgxu>.
10. Трегубов, О.В. Опыт создания лесных культур с закрытой корневой системой в зарубежных странах/ О.В. Трегубов, А.П. Лактионов, Ю.А. Мизин, О.В. Комарова, В.А. Похваленко // Астраханский вестник экологического образования. - 2022. - № 4 (70). - С. 179-189. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49338027>.
11. Фетисова, А.А. Отечественный и зарубежный опыт систем подготовки посадочного субстрата для выращивания сеянцев с закрытой корневой системой. / А.А. Фетисова // Сборник научных трудов совета молодых ученых СПбГЛТУ Т. 1. Санкт-Петербург – 2021 - С. 47-56. Режим доступа: <https://elibrary.ru/kaayrpl>.
12. McBrayer, R.H. Effects of Nursery Container Color and Spacing on Root Zone Temperatures of ‘Soft Touch’ Holly / R.H. McBrayer, J.M. Pickens, A.L. Witcher et al. // Agriculture. – 2022. – Vol. 12. – № 12. – P. 2165. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12122165>.
13. Altland J. E. Physical and Hydraulic Properties of Commercial Pine-bark Substrate Products Used in Production of Containerized Crops / J. E. Altland, J. S. Owen Jr., B. E. Jackson, J. S. Fields. – DOI <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13497-18>. – Text: direct // Hort. science. – 2018. – № 53 (12). – P. 1883-1890.
14. Ersson, B. T. Mechanized Tree Planting in Sweden and Finland: Current State and Key Factors for Future Growth / B. T. Ersson, T. Laine, T. Saksala. – DOI <https://doi.org/10.3390/f9070370> // Forests. – 2018. – № 9 (7). – P. 370.
15. Grossnickle, S. C. Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes / S. C. Grossnickle, J. E. MacDonald. – DOI <https://doi.org/10.3390/f9050283>. – Text: direct // Forests. – 2018. – Vol. 9, № 5. – P. 283.
16. McNickle, G.G. Interpreting plant root responses to nutrients, neighbours and pot volume depends on researchers’ assumptions. *Funct Ecol.* 2020; 34: 2199–2209. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13517>
17. Park B B, Han S H, Hernandez J O, An J Y, Nyam-Osor B, Jung M H, Lee P S.-H and Lee S I 2021 The Use of Deep Pot and Heterogeneous Substrate as Potentially Effective Nursery Practiceto Produce Good Quality Nodal Seedlings of *Populus Sibirica* Tausch. *Forest.* 12 418 <https://doi.org/10.3390/f12040418>.
18. Shreckhise, J.H., Owen, J.S., Jr., Eick, M.J., Niemiera, A.X., Altland, J.E. and White, S.A. (2019), Dolomite and Micronutrient Fertilizer Affect Phosphorus Fate in Pine Bark Substrate used for Containerized Nursery Crop Production. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 83: 1410-1420. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.12.0493>
19. South B. D., Nadel L. R. Irrigation in pine nurseries // *Reforesta.* 2020. No. 10. P. 40-83. <https://dx.doi.org/10.21750/REFOR.10.05.88>.
20. Tseplyaev, A.N., Tseplyaeva, A. A. Ground-based “Pot-in-Pot” system and its effectiveness in growing *Thuja occidentalis* “Smaragd” planting material in a nursery/ A.N. Tseplyaev, A. A. Tseplyaeva.-DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012092> // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. -2021- 875(1):012092.

## References

1. Bobushkina, S. V. The practice of growing forest planting material with a closed root system in relation to greenhouse complexes of the Arkhangelsk region/ S.V. Bobushkina, A.O. Senkov, D.H. Fayzulin// FBU "Northern Research Institute of Forestry" Russia, Issues of Forest Science, Vol.3, No. 4 - 2020 - 16 p., DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-16
2. Bozhidai, T. N. The effect of Basacote fertilizer on the growth and development of *Vaccinium corymbosum* L / T. N. Bozhidai. – Text: direct // Subtropical and decorative gardening. – 2020. – No. 73. – pp. 168-173. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43811716>
3. Zhigulin, E.V. The influence of illumination on the growth of seedlings with a closed root system / Zhigulin, E.V., Opletaev, A.S. // International Scientific Research Journal No. 11 (113) Part 1 - 2021 – pp. 124-128 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.113.11.022>
4. Tseplyaev, A. N. Pot-in-pot technology. Theory and practice in a production nursery / A. N. Tseplyaev // Technologies and equipment of gardening and landscape construction : collection of articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, December 20, 2018. – Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, 2019. – P. 331-333. – URL: <https://www.elibrary.ru/ZCNNYT>.
5. Nosnikov V. V., Selishcheva O. A. Characteristics of irrigation water quality and its influence on the technological aspects of growing softwood planting material with a closed root system // Trudy BSTU. Ser. 1, Forest management, nature management and processing of renewable resources. 2021. No. 2 (240). pp. 81-87. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/42147>
6. Panyavina, E. A. Economic assessment of "Pot-in-Pot" innovative technology for reforestation / E. A. Panyavina, S. S. Morkovina, A. N. Tseplyaev // Forestry Journal. – 2020. – Vol. 10. – № 3 (39). – Pp. 185-196. – Bibliogr.: pp. 193-195. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/18
7. Provorchenko, A.V. The structure of the root system of plants of rock juniper and western thuja when grown in containers/ A.V. Provorchenko, A.V, Kamenskikh L.A.// Subtropical and decorative gardening. - 2022. - No. 80. - pp. 96-103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48315907>
8. Radzhabov, A.K. Change of fertility elements of various substrates depending on their composition when growing apple seedlings with ZKS / A.K. Radzhabov, A.A. Nikitenko, V.M. Lapushkin, V.D. Strelets// Izvestiya TSKHA, issue 4 – 2020 – pp.18-31 DOI: 10.26897/0021-342X-2020-4-18-31
9. Smyshlyaeva M.I. Growing oak petiolate (*Quercus robur* L.) closed root system seedlings to create forest crops in the coniferousdeciduous forests zone of the Middle Volga region: dissertation for the degree of Candidate of Agricultural Sciences: 06.03.01 / M.I. Smyshlyaeva; [Volga State Technological University], 2018.- 139 p . URL: <https://www.dissercat.com/content/vyrashchivanie-seyantsev-duba-chereshchatogo-quercus-robur-l-s-zakrytoi-kornevoi-sistemoi-dl>
10. Tregubov, O.V. The experience of creating forest crops with a closed root system in foreign countries / O. V. Tregubov, A.P. Laktionov, Yu.A. Mizin, O.V. Komarova, V.A. Pokhvalenko // Astrakhan Bulletin of Environmental Education. - 2022. - № 4 (70). - P. 179-189. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49338027>
11. Fetisova, A.A. Domestic and foreign experience of systems of preparation of a planting substrate for growing seedlings with a closed root system. / A.A. Fetisova // Collection of scientific papers of the Council of Young Scientists of SPBGLTU Vol. 1. St. Petersburg – 2021 - pp. 47-56. URL: [https://spbftu.ru/uploads/the\\_science/publications/sbornik-nauchnyh-trudov-soveta-molodyh-uchyonyh-spbgltu/Sbornik\\_SMU\\_2021n1\\_compressed.pdf](https://spbftu.ru/uploads/the_science/publications/sbornik-nauchnyh-trudov-soveta-molodyh-uchyonyh-spbgltu/Sbornik_SMU_2021n1_compressed.pdf)
12. McBrayer, R.H. Effects of Nursery Container Color and Spacing on Root Zone Temperatures of ‘Soft Touch’ Holly / R.H. McBrayer, J.M. Pickens, A.L. Witcher et al. // Agriculture. – 2022. – Vol. 12. – № 12. – P. 2165. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12122165>.

13. Altland J. E. Physical and Hydraulic Properties of Commercial Pine-bark Substrate Products Used in Production of Containerized Crops / J. E. Altland, J. S. Owen Jr., B. E. Jackson, J. S. Fields. – DOI 10.21273/HORTSCI13497-18. – Text: direct // Hortscience. – 2018. – № 53 (12). – P. 1883-1890.
14. Ersson, B. T. Mechanized Tree Planting in Sweden and Finland: Current State and Key Factors for Future Growth / B. T. Ersson, T. Laine, T. Saksa. – DOI 10.3390/f9070370. – Text: direct // Forests. – 2018. – № 9 (7). – P. 370.
15. Grossnickle, S. C. Seedling Quality: History, Application, and Plant Attributes / S. C. Grossnickle, J. E. MacDonald. – DOI 10.3390/f9050283. – Text: direct // Forests. – 2018. – Vol. 9, № 5. – P. 283.
16. McNickle, GG. Interpreting plant root responses to nutrients, neighbours and pot volume depends on researchers' assumptions. *Funct Ecol.* 2020; 34: 2199–2209. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13517>
17. Park B B, Han S H, Hernandez J O, An J Y, Nyam-Osor B, Jung M H, Lee P S.-H and Lee S I 2021 The Use of Deep Pot and Heterogeneous Substrate as Potentially Effective Nursery Practiceto Produce Good Quality Nodal Seedlings of Populus Sibirica Tausch. *Forest.* 12 418 <https://doi.org/10.3390/f12040418>
18. Shreckhise, J.H., Owen, J.S., Jr., Eick, M.J., Niemiera, A.X., Altland, J.E. and White, S.A. (2019), Dolo-mite and Micronutrient Fertilizer Affect Phosphorus Fate in Pine Bark Substrate used for Containerized Nursery Crop Production. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 83: 1410-1420. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.12.0493>
19. South B. D., Nadel L. R. Irrigation in pine nurseries // *Reforesta.* 2020. No. 10. P. 40-83. <https://core.ac.uk/download/386153325.pdf>
20. Tseplyaev, A.N., Tseplyaeva, A. A. Ground-based “Pot-in-Pot” system and its effectiveness in growing Thuja occidentalis “Smaragd” planting material in a nursery/ A.N. Tseplyaev, A. A. Tseplyaeva.-DOI:10.1088/1755-1315/875/1/012092 – Text: direct// *IOP Conf. Ser.: Earth Environ.* -2021- 875(1):012092

### Сведения об авторах

*Попова Валентина Трофимовна* – кандидат биологических наук, зав. кафедрой Ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3765-7164>, e-mail: [bot.fiz-rast@yandex.ru](mailto:bot.fiz-rast@yandex.ru).

✉ *Цепляев Алексей Николаевич* – доктор с.-х. наук, профессор кафедры Ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1938-5660>, e-mail: [abies@mail.ru](mailto:abies@mail.ru).

*Попова Анна Александровна* – доктор с.-х. наук, профессор кафедры Ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-00034711-5377>, e-mail: [logachevaaa@rambler.ru](mailto:logachevaaa@rambler.ru).

*Пальцева Анастасия Владиславовна* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3309-8170>, e-mail: [nastya\\_dy@mail.ru](mailto:nastya_dy@mail.ru).

*Евлаков Петр Михайлович* – кандидат биологических наук, зав. лабораторией анализа ПЦР дирекции НИИ ИТЛК, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: [peter.evlakov@yandex.ru](mailto:peter.evlakov@yandex.ru).



### Information about the authors

*Valentina T. Popova* – Cand. Sci. (Biol.), Head of Department of Botany and plant physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3765-7164>, e-mail: [bot.fiz-rast@yandex.ru](mailto:bot.fiz-rast@yandex.ru).

✉ *Aleksey N. Tseplyaev* – Dr. Sci. (Agric.), Prof, department Botany and plant physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1938-5660>, e-mail: [abies@mail.ru](mailto:abies@mail.ru).

*Anna A. Popova* – Dr. Sci. (Agric.), Prof, department Botany and plant physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4711-5377>, e-mail: [logachevaaa@rambler.ru](mailto:logachevaaa@rambler.ru).

*Anastasia V. Paltceva* – post-graduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3309-8170>, e-mail: [nastya\\_dy@mail.ru](mailto:nastya_dy@mail.ru).

*Evlakov Peter Mikhailovich* – Cand. Sci. (Biol.), Head of Laboratory PCR Analysis, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-2410>, e-mail: [peter.evlakov@yandex.ru](mailto:peter.evlakov@yandex.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/8>

УДК 630.226



## Критерии выделения плюсовых насаждений в полезащитных лесных полосах на Северо-Западном Кавказе

Юрий И. Сухоруких, [drsuchor@rambler.ru](mailto:drsuchor@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5073-6102>

Светлана Г. Биганова, [svetlanabiganowa@yandex.ru](mailto:svetlanabiganowa@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0581-3612>

Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, 385000, Российская Федерация

Полезащитные лесные полосы являются одним из ведущих объектов, обеспечивающих сохранение плодородия почв и повышения продуктивности сельскохозяйственных угодий. Их создание требует использования соответствующего селекционного материала. Для этого выделяются соответствующие лесосеменные объекты, одним из которых являются плюсовые насаждения. Для их отбора требуется разработка соответствующих требований с учетом региональных особенностей. Целью настоящей работы являлось уточнение критериев выделения плюсовых насаждений для целей полезащитного лесоразведения на Северо-Западном Кавказе. При этом решались задачи, связанные с подбором высокопродуктивных полезащитных лесных полос из перспективных видов, проведением селекционной оценки, определением на них соотношения особей различных селекционных категорий, сравнением полученных результатов с данными других авторов в различных условиях. В полезащитных лесных полосах заложено 15 пробных площадей из дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), робинии псевдоакация (акация белая) (*Robinia pseudoacacia* L.), ясеня ланцетного (*Fraxinus lanceolata* В.), ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.), гледичии трёхколючковой (*Gleditschia triacanthos* L.). На каждой пробной площади по соответствующей региональной методике произведена селекционная оценка 144 – 572 деревьев. Обработка полученных результатов осуществлялась с использованием лицензионной программы Stadia 8.0/prof. На отобранных объектах вычислено соотношение плюсовых и нормальных деревьев к минусовым. Участки полезащитных лесных полос, в которых доля минусовых деревьев при селекционной инвентаризации составляет 29% и менее, рекомендовано выделять в качестве плюсовых в регионе. Для меньшего объема выборки необходимо уточнение доли минусовых деревьев.

**Ключевые слова:** полезащитные лесные полосы, *Quercus robur* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Fraxinus lanceolata* В., *Fraxinus excelsior* L., *Gleditschia triacanthos* L., плюсовые насаждения, критерии отбора, региональные особенности, селекционные категории деревьев, лесные участки.

**Финансирование:** Исследования выполнялись за счет средств гранта ФГБОУ ВО «МГТУ», шифр работы НП6-2023 и хоз. договора № X15-21.

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


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


**Для цитирования:** Сухоруких, Ю. И. Критерии выделения плюсовых насаждений в полезащитных лесных полосах на Северо-Западном Кавказе / Ю. И. Сухоруких, С. Г. Биганова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 102–116. – Библиогр.: с. 113–116 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/8>.

Поступила 13.07.2023. Пересмотрена 10.11.2023. Принята 11.11.2023. Опубликована онлайн 30.11.2023.

Article

## Selection Criteria for Plus Stands in Field-Protective Forest Belts in the North-Western Caucasus

Yuri I. Sukhorukikh, drsuchor@rambler.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-5073-6102>

Svetlana G. Biganova, svetlanabiganowa@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0581-3612>

Maykop State Technological University, Pervomayskaya str., 191, Maykop, 385000, Russian Federation

### Abstract

Field-Protective Forest Belts (FPFB) are one of the leading objects that ensure the preservation of soil fertility and increase the productivity of agricultural land. The appropriate breeding material is needed for their creation. The suitable forest-seeded objects are selected for this purpose, one of them are plus stands (PS). For the selection of PS, it is necessary to develop appropriate requirements taking into account their regional features. The purpose of this work was to set the PS selection criteria for protective afforestation in the North-Western Caucasus. In this regard, the following tasks have been performed: selection of highly productive forest belts from promising species, selection assessment, determining the ratio of individuals of various breeding categories, comparing the results obtained with data from other authors in various conditions. Fifteen sample plots (SP) have been laid in the field-protective forest belts consisting of pedunculate oak (*Quercus robur* L.), pseudoacacia robinia (white acacia) (*Robinia pseudoacacia* L.), lanceolate ash (*Fraxinus lanceolata* B.), common ash (*Fraxinus excelsior* L.), three-pronged gleditschia (*Gleditschia triacanthos* L.). Thus, 144 – 572 trees were assessed on each sample plot according to the corresponding regional methodology. The processing of the obtained results was carried out using the licensed program Stadia 8.0/prof. The ratio of plus and normal trees to minus trees was calculated on the selected objects. The plantings with 29% or less of minus trees in the selection inventory are recommended to be selected as plus trees in the region. For a smaller sample size, it is necessary to clarify the proportion of negative trees.

**Keywords:** field-protective forest belts, *Quercus robur* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Fraxinus lanceolata* B., *Fraxinus excelsior* L., *Gleditschia triacanthos* L. plus stands, selection criteria, regional features, selection categories of trees, forest areas.

**Funding:** The research was carried out at the expense of the grant of FSBI HE “Maykop State Technological University”, the code NP6-2023, the Contract no. X15-21.

**Acknowledgements:** the authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of the article.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

**For citation:** Sukhorukikh Y. I., Biganova S. G. (2023). Selection Criteria for Plus Stands in Field-Protective Forest Belts in the North-Western Caucasus. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 102-116 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/8>.

*Received* 13.07.2023. *Revised* 10.11.2023. *Accepted* 11.11.2023. *Published online* 30.11.2023.

### Введение

Сохранение плодородия почв и повышение продуктивности агроландшафтов является важной государственной задачей для Российской Федерации [8-10, 19]. В этом значительная роль принад-

лежит полезащитным лесным полосам [1, 4]. Их эффективность доказана в многочисленных исследованиях отечественных и зарубежных авторов [18-20].

Проблема создания новых высокопродуктивных полезащитных лесных полос является острой в связи с их неудовлетворительным состоянием во многих регионах страны [5,10,14]. Для ее разрешения необходимо проведение селекционных работ по выделению и созданию устойчивых и высокопроизводительных, хозяйственно-ценных сортов и форм лесных растений [3,10,16]. Учитывая длительный срок создания и испытания лесосеменных плантаций в ближайшее время решение этой проблемы будет связано именно с использованием семян от плюсовых насаждений, отбираемых в лучших полезащитных лесных полосах. Такой подход не только ускорит получение высокопродуктивного селекционного материала, но и будет способствовать сохранению лучшего генофонда лесных древесных видов растений [16].

Плюсовые насаждения – это самые высокопродуктивные, высококачественные и устойчивые для данных лесорастительных условий насаждения. Выделяют их на основе селекционной инвентаризации с учётом определенных требований и целевого использования. Единых правил отбора плюсовых насаждений нет и для этих целей необходима разработка региональных рекомендаций (Приказ Минприроды России от 20.10.2015 № 438 «Об утверждении Правил создания и выделения объектов лесного семеноводства (лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков и подобных объектов)» URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rossii-ot-20102015-n-438/> (дата обращения: 04.07.2023). В качестве критерия может использоваться доля минусовых деревьев и полнота на отбираемом плюсовом насаждении [2,15].

Однако учет полноты насаждения мало приемлем для полезащитных лесных полос, поскольку для многих регионов отсутствуют соответствующие таблицы хода роста, что не позволяет точно определить полноту. Также различие продуктивности особей в крайних и срединных рядах полезащитной лесной полосы потребует дополнительных таблиц с учетом их конструкции. Подобный научный подход усложнит селекционные работы и не будет способствовать их качественному выполнению. Здесь наиболее приемлем метод учета

соотношения деревьев различных селекционных категорий, ориентированный на региональные особенности и сложившуюся практику выделения участков, имеющих высокую продуктивность и отличное состояние [2,15,16]. При этом следует учитывать специфику и целевое назначение создаваемых объектов [6,7,17].

В литературе сообщается о формировании лесной среды в предельно узких полезащитных лесных полосах [13]. Визуально подобный процесс наблюдался и нами на изучаемых и аналогичных объектах. Теоретически это позволяет предположить о наличии некоторых сходных процессов развития растительных сообществ с участием лесных видов и возможности сравнения аналогичных критериев выделения лесосеменных объектов. Имеются данные, что в аттестованном плюсовом насаждении дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) на заложенных в нем пробных площадях различной численности наблюдается значительное изменение доли минусовых деревьев. Детально этот вопрос не изучался [2].

Необходимость отбора плюсовых насаждений и отсутствие региональных критериев для их выделения с учетом численности особей делает проблему актуальной.

Целью работы является разработка критериев выделения плюсовых насаждений в полезащитных лесных полосах с учетом доли минусовых деревьев и численности особей в выборке для условий Северо-Западного Кавказа.

### Материалы и методы

#### Предмет и объект исследования

Исследования проводились в лучших по состоянию и развитию 3-9 рядных полезащитных лесных полосах Северо-Западного Кавказа (Краснодарский край и Республика Адыгея), созданных из основных пород – ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.), робинии псевдоакалии (акалии белой) (*Robinia pseudoacacia*), ясеня ланцетного (*Fraxinus lanceolata* B.), гледичии трёхколючковой (*Gleditschia triacanthos* L.), дуба черешчатого (*Quercus robur* L.). Для каждого вида заложено по три пробных площади, всего 15 площадей. Их таксационные показатели и местоположение приводятся в табл. 1.

## Сбор данных

Предварительно собирали сведения о местах произрастания полевых защитных лесных полос из изучаемых видов. В ходе экспедиционных работ осуществлялся визуальный осмотр состояния и продуктивности объектов. Устанавливались координаты нахождения и высота над уровнем моря для каждого объекта. Для каждого изучаемого вида обследовалась 50 – 80 полос, из которых на основе вычисленного бонитета и визуальной оценки состояния выбирались соответствующие плюсовым насаждения. Общая протяженность экспедиционных маршрутов составила 2500 км. На опытных объектах сплошной селекционной оценке подвергались 144 – 572 растения на пробных площадях длиной 110 – 750 м. Крайние ряды полосы длиной 50 м в учет не включались. Возраст определялся по срезанным пням, а при их отсутствии – по кернам, взятых возрастным буром, бонитет по справочным материалам [12]. Среднюю высоту деревьев на каждой пробной площади устанавливали на основе ее измерения высотомером у 15 особей и последующего определения среднего значения. Отбор растений для этого производился в случайном порядке по всей площади участка.

Координаты, высоту над уровнем моря определяли с использованием GPS-навигатора.

Плюсовые, нормальные, минусовые деревья выделяли согласно придержкам превышения по высоте и состоянию (табл. 2) [11].

## Анализ данных

Статистическую обработку данных осуществляли с использованием лицензионной программы Stadia 8.0/prof. Значение критерия отбора плюсовых насаждений в полевых защитных лесных полосах устанавливали, как среднее по всем пробным площадям на основании соотношения минусовых деревьев к их общему числу на объекте.

Нахождение теоретических значений численности минусовых деревьев осуществляли по моделям, вычисленным общепринятым методом наименьших квадратов с использованием стандартного регрессионного анализа. Статистическую связь между показателями устанавливали по обычно применяемому для подобных исследований значениям коэффициентов Спирмена и Кендала. Сопряженность видового состава с долей минусовых деревьев, минусовых с плюсовыми и нормальными устанавливали с использованием статистики Хи-квадрат, которая представляет собой нормированную сумму квадратов различий между эмпирическими и теоретическими частотами встречаемости признака.

Выводы делались на основании заключений, выдаваемых программой. Основные параметры заключения в работе приводятся без изменений. Для удобства компоновки текста графический материал создавался с использованием программы Microsoft Excel.

Таблица 1

Таксационные показатели пробных площадей, используемых в исследовании для выделения плюсовых, минусовых и нормальных деревьев в полевых защитных лесных полосах

Table 1

Taxation indicators of trial plots used in this study for the allocation of plus, minus and normal trees in field shelterbelt

Номер пробной площади/Trial area number	Широта / Latitude	Долгота / Longitude	Высота над уровнем моря, м/ Height above sea level, m	Возраст, лет/ Age, years	Происхождение/ Origin	Средняя высота, м/ Average height, m	Бонитет / Site class
1	С 45°05'08.1032"	В40°20'07.1899"	99	55	Семенное	19.6	1
2	С44°47'30.0349"	В 40°09'28.9147"	169	45	Семенное	18.9	1А
3	С 45°20'34.4029"	В 39°46'52.5271"	74	65	Семенное	24.9	1А
4	С 44°47'18.1697"	В 40°08'49.5401"	168	45	Семенное	17.4	1
5	С 44°51'20.2877"	В 39°50'14.9253"	90	55	Семенное	19.6	1

## Природопользование

Номер пробной площади/Trial area number	Широта / Latitude	Долгота / Longitude	Высота над уровнем моря, м/ Height above sea level, m	Возраст, лет/ Age, years	Происхождение/ Origin	Средняя высота, м/ Average height, m	Бонитет / Site class
6	С 44°52'02.5073"	В 40°07'03.5207"	136	50	Семенное	15.8	2
7	С 44°41'57.6444"	В 40°40'34.1076"	238	40	Семенное	15.2	1
8	С 45°17'13.2033"	В 39°51'39.9263"	95	40	Семенное	15.8	1
9	С 45°10'44.8977"	В 40°35'28.1993"	114	27	Порослевое	17.1	1А
10	С 44°37'22.3480"	В 40°03'17.8392"	202	48-50	Семенное	17.7	1
11	С 44°37'58.1099"	В 40°37'42.0501"	336	40-42	Семенное	17.2	1
12	С 45°18'57.6325"	В 39°53'49.3547"	85	65	Семенное	18.1	2
13	С 44°38'00.4873"	В 40°37'03.4649"	262	48-50	Семенное	25.4	1Б
14	С 45°02'44.5524"	В 39°49'38.7827"	57	55	Семенное	20.1	1
15	С 44°35'18.4923"	В 40°51'14.3845"	345	65	Семенное	21.3	1

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: authors' own calculations.

Таблица 2

Характеристика деревьев различных селекционных категорий, выделяемых в данном исследовании

Table 2

Characteristics of trees of various breeding categories identified in this study

Категория   Category	Критерии идентификации дерева   Tree identification criteria
Плюсовые   Plus trees	<p>Деревья хорошего и выдающегося развития, превышающие среднее значение по высоте на 25% и более, окраска и величина листьев, густота и форма, наличие сухих и усыхающих ветвей в кроне типичные для здоровых особей этой породы, возраста, сезона и условий местопроизрастания, прирост текущего года не снижен, повреждения стволов, ветвей вредителями и поражение болезнями отсутствуют, механических повреждений ствола, скелетных ветвей, ран, дупел нет.</p> <p>  Trees of good and outstanding development, exceeding the average height by 25% or more, color and size of leaves, density and shape, the presence of dry and drying branches in the crown are typical for healthy individuals of this breed, age, season and growing conditions, the growth of the current year is not reduced, damage to trunks, branches by pests and damage there are no diseases, no mechanical damage to the trunk, skeletal branches, wounds, hollows.</p>
Минусовые   Minus trees	<p>Деревья слаборазвитые, имеющие высоту на 25% менее средней. Независимо от высоты - особи в активной стадии повреждения неблагоприятными факторами с явно выраженными признаками ухудшения состояния: листья менее и светлее типичных для этой породы, возраста, сезона и условий местопроизрастания, деревья частично усохшие или усыхающие, значительно суховершинные, имеющие недостаточно развитую ажурную крону, прирост слабый (менее половины обычного), наличие в кроне по причине ослабления усыхающих более 2/3 или сухих ветвей более 35%, обильные водяные побеги на стволе и ветвях, плодовые тела трутовых грибов, дупла, значительные механические повреждения ствола, сильные признаки повреждения болезнями и вредителями листьев, частые - ствола, корневых лап, ветвей, в том числе, попытки или местные поселения стволовых вредителей,(входные отверстия, насечки, сокотечение, буровая мука и опилки, насекомые на коре, под корой и в древесине), деревья в сильной степени с высокой вероятностью их усыхания в текущем или следующем вегетационном периоде, деревья</p>

Категория   Category	Критерии идентификации дерева   Tree identification criteria
	усохшие в текущем вегетационном периоде и живые ветровальные в текущем году.   The trees are underdeveloped, having a height of 25% less than average. Regardless of height - individuals in the active stage of damage by adverse factors with pronounced signs of deterioration: leaves are less and lighter than typical for this breed, age, season and growing conditions, trees are partially shrunken or shrinking, significantly dry-topped, with insufficiently developed openwork crown, weak growth (less than half of the usual), the presence in the crown due to the weakening of drying more than 2/3 or more than 35% dry branches, abundant water shoots on the trunk and branches, fruit bodies of tinder mushrooms, hollows, significant mechanical damage to the trunk, strong signs of damage by diseases and pests of leaves, frequent - trunks, root paws, branches, including attempts or local settlements of stem pests, (entrance holes, notches, sap flow, drilling flour and sawdust, insects on the bark, under the bark and in the wood), trees to a strong extent with a high probability of their shrinking in the current or next growing season, shrunken trees in the current growing season and live wind trees in the current year.
Нормальные   Normal trees	Все остальные   Everyone else

Источник: Сухоруких, Ю.И. Критерии отбора плюсовых деревьев для защитного лесоразведения / Ю. И. Сухоруких, С. Г. Биганова, А. П. Глинушкин, Л. Л. Свиридова // Новые технологии. – 2023. – Т. 19. – № 1. – С. 69-79. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/POBCRO>

Source: Sukhorukikh, Yu.I. Criteria for the selection of plus trees for protective afforestation / Yu. I. Sukhorukikh, S. G. Biganova, A. P. Glinushkin, L. L. Sviridova // New technologies. – 2023. – Vol. 19. – No. 1. – PP. 69-79. – DOI: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-1-69-79>.

### Результаты и обсуждение

Анализ таксационных показателей пробных площадей (табл. 1) указывает, что отобранные для изучения насаждения по продуктивности в конкретных условиях соответствуют требованиям, предъявляемым к отбираемым в качестве плюсовых насаждений. Так, по высшим бонитетам 1б – 1 произрастало 86.67% участков. Остальные 2, представляющие 13.33% выборки имели показатели 2 бонитета, но отобраны по продуктивности и состо-

янию, как лучшие для своих условий, что не противоречит принципам отбора плюсовых насаждений [3,8,15]. Близкие значения бонитетов плюсовых насаждений дуба на лесных участках отмечены в Центральном Черноземье России, которые составили для 1а – 1 бонитета – 83.33; 1.5 бонитета (по правилам округления 2) – 16.67%, процентное соотношение вычисляли по данным [2]. Соотношение различных селекционных категорий деревьев на изучаемых объектах представлено в табл. 3.

Таблица 3

Соотношение селекционных категорий деревьев в полезащитных лесных полосах на Северо-Западном Кавказе

Table 3

The ratio of breeding categories of trees in field-protective forest belts in the North-Western Caucasus

№ пробной площади	Количество учтённых деревьев, шт.	Количество плюсовых и нормальных деревьев		Количество минусовых деревьев	
		шт.	%	шт.	%
1	334	247	73.95	87	26.05
2	202	136	67.33	66	32.67
3	174	122	70.11	52	29.89
4	144	112	77.78	32	22.22
5	383	270	70.50	113	29.50
6	572	411	71.85	161	28.15

## Природопользование

№ пробной площади	Количество учтённых деревьев, шт.	Количество плюсовых и нормальных деревьев		Количество минусовых деревьев	
		шт.	%	шт.	%
7	354	253	71.47	101	28.53
8	374	255	68.18	119	31.82
9	267	190	71.16	77	28.84
10	226	156	69.03	70	30.97
11	388	281	72.42	107	27.58
12	291	200	68.73	91	31.27
13	430	306	71.16	124	28.84
14	431	290	67.29	141	32.71
15	330	250	75.76	80	24.24
Среднее, %			71.11		28.89

Примечание. Упомянутые в работе категории плюсовые деревья и плюсовые насаждения носят условный характер, поскольку юридически данный статус присваивается им после оформления соответствующей документации и аттестации специальной комиссией. Для данного исследования подобное документальное оформление не требуется.

Note: The categories of plus trees and plus plantings mentioned in the work are conditional, since legally this status is assigned to them after the relevant documentation is issued and attested by a special commission. For this study, such documentation is not required.

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: authors' own calculations

Результаты статистической обработки данных не выявили достоверной связи сопряжённости видового состава с соотношением численности плюсовых и нормальных к минусовым деревьям (Хи-квадрат = 15.81, значимость  $p = 0.33$ , степен. свободы = 14. Гипотеза 0: Нет связи между признаками), а также с долей минусовых деревьев (%) в выборке (Хи-квадрат = 9.281, значимость  $p = 0.8127$ , степен. свободы = 14. Гипотеза 0: Нет связи между признаками).

В пределах численности изучаемых выборок также отсутствует статистически достоверная связь между количеством учтённых (шт.) и долей (%) минусовых деревьев (коэффициент Кендала = 0.0381,  $Z = 0.1979$ , значимость  $p = 0.4215$ , степени свободы = 15; гипотеза 0: нет корреляции между выборками. Коэффициент Спирмена = 0.02946,  $Z = 0.1059$ . Значимость = 0.4578, степени свободы = 15. Гипотеза 0: нет корреляции между выборками). Аналогичный вывод сделан и при построении регрессионной модели (рис. 1). Данные результаты указывают на селекционную однородность отобранных пробных площадей.

Таким образом, для изучаемых объектов независимо от видового состава возможно использовать среднее значение показателя. Для минусовых деревьев оно составило 28.89 %, или округлённо, как это принято в соответствующих нормативных документах, равно 29 %. Соответственно, на долю плюсовых и нормальных деревьев приходится 71 % (табл. 3).

Для проверки вывода дополнительно создана модель зависимости численности минусовых деревьев от объема выборки (рис.2). На её основе рассчитаны теоретические значения количества минусовых деревьев (шт./%) для выборок различной величины (табл.4). Как следует из полученных данных, доля минусовых деревьев составила 28.67 % при выборке 144 особи. Это близкое значение с полученным другим методом показателем – 28.89 %. Для большего объема выборки доля минусовых деревьев не изменяется в пределах значений округления 29 % (табл.3).

Учитывая формирование лесной среды в защитных лесных полосах [13] на основании данных других авторов нами проведено сравнение



доли минусовых деревьев на пробных площадях различной численности, заложенных в аттестованном плюсовом насаждении дуба черешчатого

(*Quercus robur* L.) в Центральном Черноземье России [2]. Исходные литературные данные представлены в табл. 5.

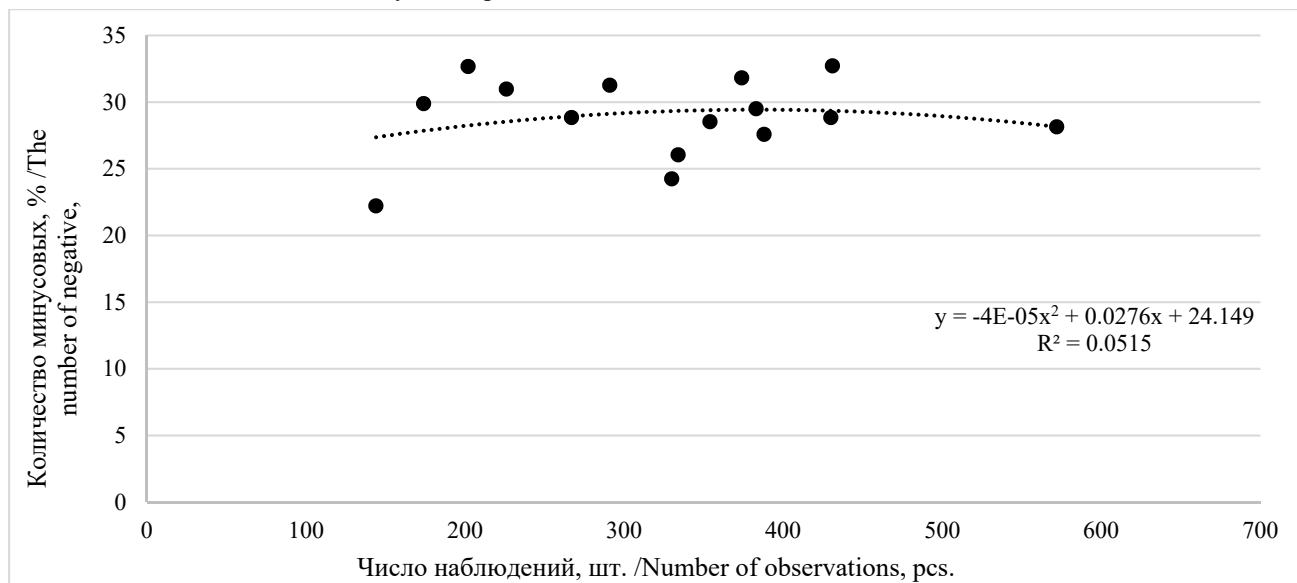


Рисунок 1. Зависимость количества минусовых деревьев (%) от числа учтённых деревьев (шт.) на пробных площадях на Северо-Западном Кавказе.

Figure 1. The dependence of the number (%) of minus oak trees on the number taken into account in the sample plots in the North-Western Caucasus.

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

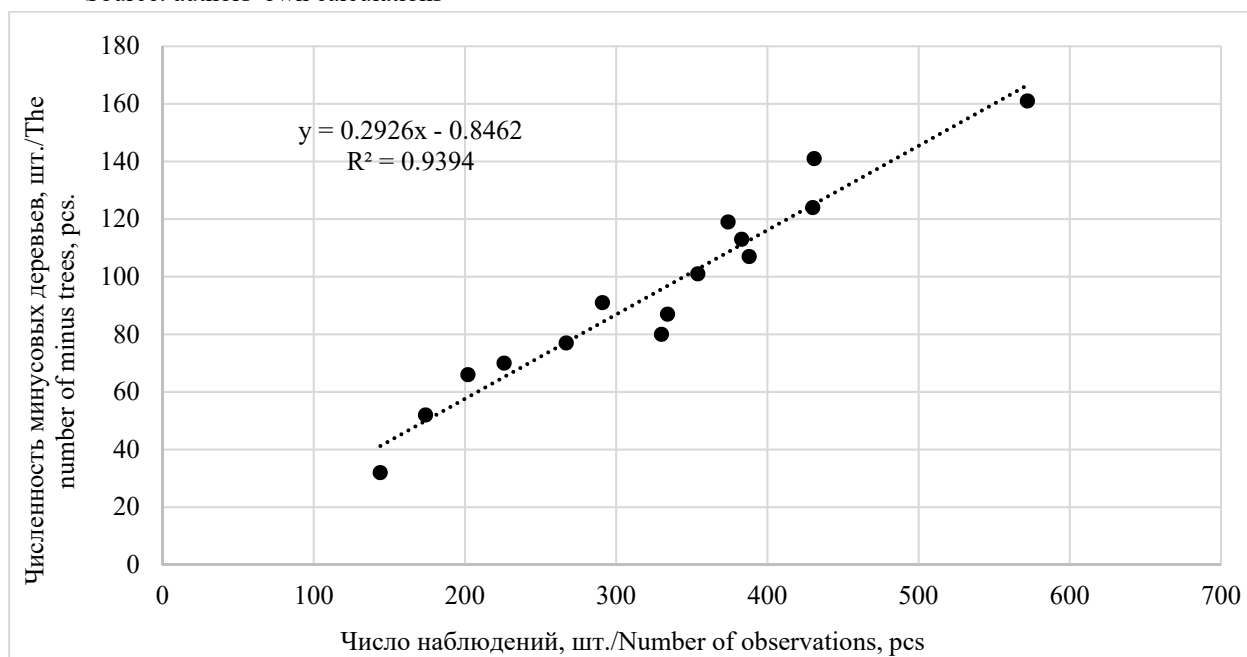


Рисунок 2. Зависимость количества минусовых деревьев (шт.) от общей численности выборки (шт.) на пробных площадях на Северо-Западном Кавказе

Figure 2. The dependence of the number of minus trees (pcs.) on the total number of samples (pcs.) in the sample areas in the North-Western Caucasus

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

Таблица 4

Расчетное количество минусовых деревьев на пробных площадях Северо-Западного Кавказа в зависимости от объема выборки

Table 4

The estimated number of negative trees in the sample areas of the North-Western Caucasus, depending on the sample size

Объем выборки, шт./ Sample size, pcs.	144	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Расчетное число минусовых деревьев, шт./ The estimated number of minus trees, pcs.	41.29	43.04	57.67	72.30	86.93	101.56	116.19	130.82	145.45	160.08	174.71
Расчетное количество минусовых деревьев, %/ Estimated number of negative trees, %	28.67	28.70	28.84	28.92	28.98	29.02	29.05	29.07	29.09	29.11	29.12

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: authors' own calculations.

Таблица 5

Численность учтенных и доля минусовых деревьев на пробных площадях дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в Центральном Черноземье России (извлечение из литературных данных [2]).

Table 5

The number of registered and the proportion of negative trees on the trial areas (*Quercus robur* L.) of oak in the Central Chernozem region of Russia (extract from the literature data [2]).

Номер пробной площади/ Trial area number	Численность учтенных деревьев, шт./ The number of registered trees, pcs.	Минусовых деревьев, шт. / % / Minus trees, pcs. / %
1	84	16 / 19.05
2	108	32 / 29.63
3	102	26 / 25.49
4	102	13 / 12.95
5	129	29 / 22.48
6	90	15 / 16.67
7	75	3 / 4.0
8	104	12 / 11.54
9	42	6 / 14.29
10	27	3 / 11.11

Источник: извлечение из литературных данных [2].

Source: extract from literature data [2]

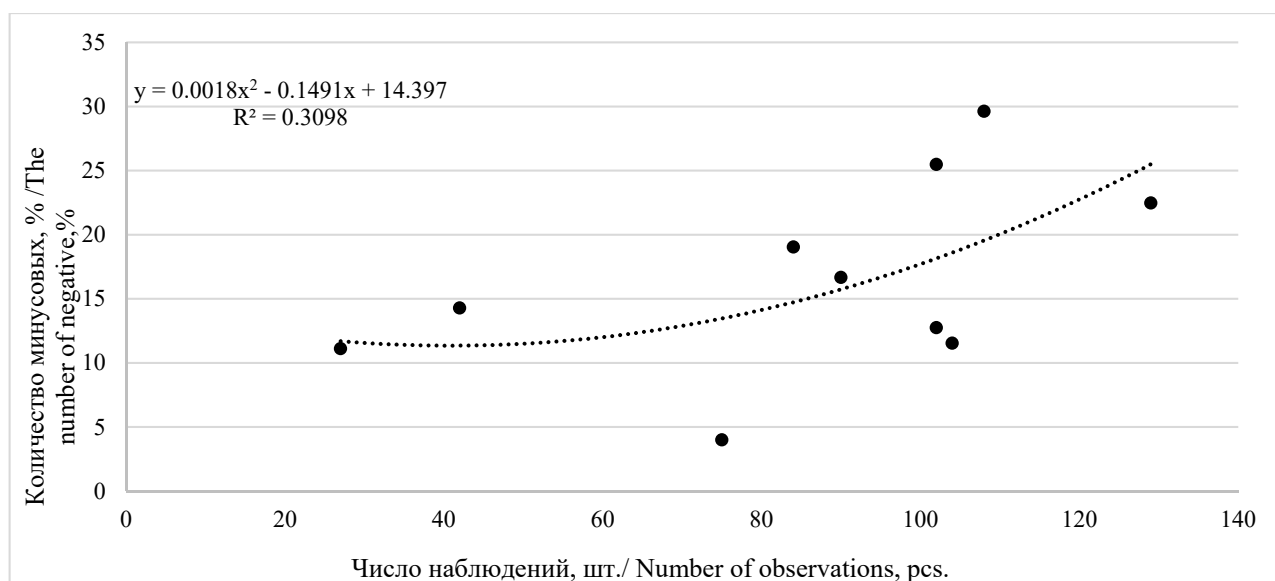


Рисунок 3. Зависимость доли (%) минусовых деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L. от числа учтённых на пробных площадях в Центральном Черноземье России (исходные данные по [2]).

Figure 3. The dependence of the number (%) of minus oak trees (*Quercus robur* L.) on the number taken into account in the sample plots in the Central Chernozem region of Russia (initial data for [2]).

Источник: собственная композиция авторов на основе извлечения из литературы [2].

Source: authors' own composition based on extracts from the literature [2].

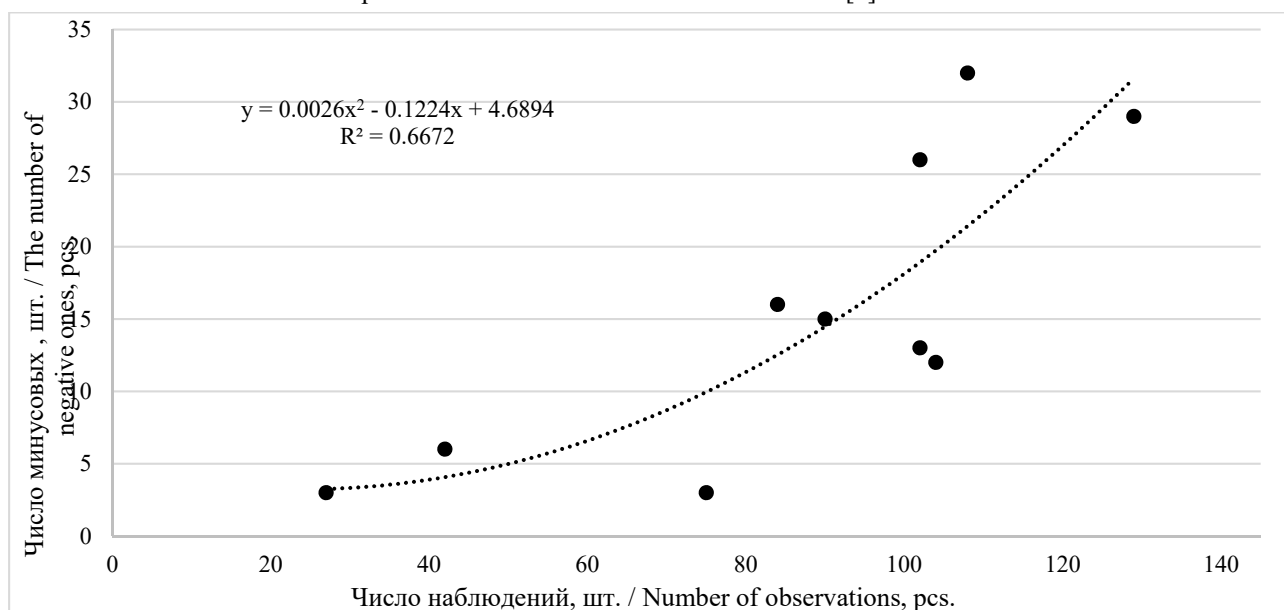


Рисунок 4. Зависимость количества (шт.) минусовых деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) от числа учтённых на пробных площадях в Центральном Черноземье России (исходные данные по [2]).

Figure 4. The dependence of the number (pcs.) of minus oak trees (*Quercus robur* L.) on the number taken into account on trial areas in the Central Chernozem region of Russia (initial data for [2]).

Источник: собственная композиция авторов на основе извлечения из литературы [2].

Source: authors' own composition based on extracts from the literature [2].

Из данных табл. 5 следует, что на 10 пробных лесных площадях имелось от 27 до 129 особей

вида, а доля минусовых деревьев изменялась от 3 до 32 шт. или 4 - 29.63 %. По имеющимся данным

табл. 5, для небольшой выборки на 10 участках установлена зависимость количества минусовых деревьев в процентах от численности выборки в шт. (рис. 3). Однако вследствие невысокого значения  $R^2 = 0.3098$  данная математическая модель нами не использовалась.

По графической модели (рис. 3) возможно проследить тренд некоторого увеличения количества (%) минусовых деревьев от объема выборки

(шт.), но данное заключение отличается от вычисленного при выборке свыше 144 рамет (табл. 3, 4).

Используя рассматриваемые данные (табл. 5), построена адекватная модель ( $R^2 = 0.6623$ ). зависимости численности минусовых деревьев от общего числа учтённых (рис. 4). На её основе для заданных величин выборки от 27 до 144 особей рассчитано теоретическое количество минусовых деревьев (табл. 6).

Таблица 6

Теоретические значения количества минусовых деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в зависимости от объема выборки на пробных площадях в плюсовом насаждении

Table 6

Theoretical values of the number of minus oak trees (*Quercus robur* L.) depending on the sample size on the sample areas in the plus planting

Объем выборки Sample size	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	144
Расчетное число минусовых деревьев, шт./ Estimated number of minus trees, pcs.	3.19	3.27	3.79	4.82	6.35	8.37	10.90	13.92	17.45	21.48	26.00	31.03	36.55	38.90
Расчетное количество минусовых деревьев, %/ Estimated number of minus trees, %.	12.77	10.89	9.48	9.64	10.58	11.96	13.62	15.47	17.45	19.52	21.67	23.87	26.11	27.02

Источник: собственные вычисления авторов.

Source: authors' own calculations.

Как следует из полученных результатов (табл. 6), наблюдается возрастание процента минусовых деревьев с 9.48 до 27.02% при увеличении численности выборки от 25 до 144 шт. При достижении значения выборки в 144 особи полученный результат в 27.02 % имеет близкое к вычисленному нами – 28.89 %, а отличие составляет всего 1.87 %.

Согласованность этих значений может служить дополнительным аргументом подтверждения адекватности вычисленного значения доли минусовых деревьев для выделения плюсовых насаждений в полевых защитных лесных полосах и гипотезы фор-

мировании в них лесной среды [13]. При этом, учитывая выявленное снижение доли минусовых деревьев в небольших по численности выборках, для них следует уточнить долю минусовых деревьев на участках полевых защитных лесных полос, выделяемых в качестве плюсовых насаждений.

### Выводы

1. В условиях Северо-Западного Кавказа отбор плюсовых насаждений в полевых защитных лесных полосах для целей полевых защитного лесоразведения следует осуществлять в лесополосах численностью не менее 144 особей, где доля минусовых деревьев

при селекционной инвентаризации составляет 29 % и менее.

2. В изучаемых полевых защитных лесных полосах не выявлена достоверная сопряженность видового состава с общей долей минусовых деревьев, а также соотношением долей плюсовых и нормальных к минусовым деревьям.

3. Статистически достоверная связь между численностью выборки более 144 особей и долей минусовых деревьев в полевых защитных лесных полосах отсутствует.

4. В плюсовом насаждении дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) Центрального Черноземья России доля минусовых деревьев достоверно увеличивается на пробных площадях при возрастании численности выборки от 27 до 129 особей.

5. Для выделения в полевых защитных лесных полосах плюсовых насаждений численностью менее 144 особей необходимо уточнить критериальный показатель доли минусовых деревьев.

### Список литературы

1. Грибачева, О. В. Оценка влияния полевой защитной лесополосы на отложение снежного покрова в УНПАК ЛНАУ "Колос" / О. В. Грибачева, А. И. Чернотубов, Д. В. Сотников // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10. № 3 (39). С. 43-53. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/5. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/UJPPPC>.
2. Кострикин, В. А. Критерии оценки плюсовых насаждений дуба / В. А. Кострикин, В. К. Ширнин, С. А. Крюкова // Известия вузов. Лесной журнал. – 2021. – № 4 – С. 68-79. – DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-68-79. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/FWZRUS>.
3. Крючков, К. Н. Стратегия сортового семеноводства для искусственного лесоразведения в экстремально засушливых условиях / С. Н. Крючков, А. С. Стольников // Научно-аграрный журнал. 2018. № 2 (103). С. 48-50. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/YRALUT>.
4. Кулик, К. Н. Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов / К. Н. Кулик, А. И. Беляев, А. М. Пугачёва // Аридные экосистемы, 2023, том. 29, № 1(94), с. 4-14. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-1-4-14. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/CSZXWA>.
5. Кулик, К. Н. Современное состояние защитных лесонасаждений в Российской Федерации и их роль в смягчении последствий засух и опустынивания земель // Научно-аграрный журнал. 2022. №3(118). С. 08-13. – DOI: 10.34736/FNC.2022.118.3.001.08-1. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/LWWQFG>.
6. Михин, В. И. Лесоводственно-мелиоративные особенности полевых защитных насаждений Краснодарского края / В. И. Михин, Е. А. Михина // Успехи современного естествознания. 2021. № 12. С. 218-222. – DOI 10.17513/use.37761. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/FYKHCR>.
7. Рулев, А. С. Развитие растениеводства на региональном уровне (на примере Волгоградской области). / А. С. Рулев, А. М. Пугачёва // Проблемы прогнозирования. – 2019. – № 5 (176). – С. 112-119. Development of plant growing at the regional level (based on the example of Volgograd oblast). Rulev A.S., Pugacheva A.M. Studies on Russian Economic Development. 2019. Т. 30. № 5. С.557-562. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/WMRMRO>.
8. Рулев, А. С. Формирование новой агролесомелиоративной парадигмы. / А.С. Рулев, А.М. Пугачёва // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89. – № 10. – С. 1044-1051. Formation of a new agroforestry paradigm Rulev A.S., Pugacheva A.M. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2019. Т. 89. № 10. С. 495-501. – DOI 10.31857/S0869-587389101044-1051. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/GPUZVY>.
9. Рулев А. С. Оценка современного состояния полевых защитных лесных полос различной продуваемости // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Т. 14, No5. С. 152-165. DOI: 10.12731/2658-6649-2022-14-5-152-165 – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/OIYARE>.
10. Стратегия развития защитного лесоразведения в Российской Федерации на период до 2025 года / К. Н. Кулик, А. Л. Иванов, А. С. Рулев [и др.]. – переработанная и дополненная. – Волгоград: Федеральный

научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, 2018. – 36 с. – ISBN 5-900761-51-7. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/THPVGI>.

11. Критерии отбора плюсовых деревьев для защитного лесоразведения / Ю. И. Сухоруких, С. Г. Биганова, А. П. Глинушкин, Л. Л. Свиридова // Новые технологии. – 2023. – Т. 19. – № 1. – С. 69-79. – DOI 10.47370/2072-0920-2023-19-1-69-79. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/POBCRO>.

12. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепаченко, С. Нильссон, Ю. И. Булуй. – Москва. – 2008. – 803 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/QKQBEN>.

13. Тунякин, В. Д. Лесообразовательный процесс в предельно узкой полезащитной лесной полосе / В. Д. Тунякин, Н. В. Рыбалкина, Л. М. Шеншин // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 2 (46). – С. 56–67. – Библиогр.: с. 65–67 (12 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/5>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/TQCCRZ>.

14. Турусов, В. И. Опыт реконструктивных рубок в лесных полосах Каменной Степи / В. И. Турусов, А. С. Чеканышкин, А. А. Лепехин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 5(371). – С. 48-56. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.5.48. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/GXAFAC>.

15. Царев, А.П. Лесные плюсовые насаждения и критерии их отбора. /А.П. Царёв, Н.В. Лаур // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2019. – № 132. – С. 79-86. – DOI 10.25684/NBG.boolt.132.2019.10. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/JJYMYU>.

16. Kryuchkov S.N Breeding effect of selection methods (population, seed, and single-plant) at seed sites of various genetic levels in the Volgograd region / S. N. Kryuchkov, A. V. Solonkin, A. S. Solomentseva [et al.] // E3S Web of Conferences : International Scientific and Practical Conference “Ensuring the Technological Sovereignty of the Agro-Industrial Complex: Approaches, Problems, Solutions” (ETSaIC2023), Yekaterinburg City, Russian Federation, 16–17 февраля 2023 года. Vol. 395. – Yekaterinburg City, Russian Federation: EDP Sciences, 2023. – P. 03001. – DOI 10.1051/e3sconf/202339503001. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/EMFBBM>.

17. Kulik K.N. Kulik, K. N. The Role of Protective Afforestation in Drought and Desertification Control in Agro-Landscapes / K. N. Kulik, A. I. Belyaev, A. M. Pugacheva // Arid Ecosystems. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 1-10. – DOI 10.1134/S2079096123010079. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/OSGDIB>.

18. Mikhin V.I. Agri-environmental role of protective forest plantations / V.I. Mikhin, E.A. Mikhina, V.V. Tanyukevich. //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International scientific and practical conference "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions" (Forestry-2019). – 2019. – С. 012066. DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012066>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/SEYAKI>.

19. Mikhin V.I., Tanyukevich V.V., Mikhina E.A. Growth and ameliorative role of protective plantation in conditions of forest-steppe zone IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions".2020; 595:012045. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012045>.

20. Sarah Taylor Lovell, Kiruba Krishnaswamy, Chung-Ho Lin, Nicholas Meier, Ronald S. Revord, Andrew L. Thomas. Nuts and berries from agroforestry systems in temperate regions can form the foundation for a healthier human diet and improved outcomes from diet-related diseases. Agroforestry Systems (2023) 97:1347–1360 <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00858-8>.

### References

1. Gribacheva, O. V. Assessment of the impact of a protective forest belt on the deposition of snow cover in the UNPAC LNAU "Kolos" / O. V. Gribacheva, A. I. Chernodubov, D. V. Sotnikov // Forestry Engineering Journal. – 2020. – Vol. 10, No. 3(39). – pp. 43-53. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.3/5>.

2. Kostrikin, V.A. Criteria for evaluating positive oak plantings. / V.A. Kostrikin, V.K. Shirnin, S.A. Kryukova // News of universities. Forest Journal. – 2021. – No. 4 – pp. 68-79. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-68-79>.
3. Kryuchkov, K.N. Strategy of varietal seed production for artificial afforestation in extremely arid conditions / S.N. Kryuchkov, A.S. Stolnov // Scientific and Agronomic journal. 2018. No. 2 (103). pp. 48-50. - Access mode: <https://www.elibrary.ru/YRALUT>.
4. Kulik, K.N. Substantiation of the forecast of the development of protective afforestation in the Volgograd region. /K.N. Kulik, A.T. Barabanov, A.S. Manaenkov, A.K. Kulik // Forecasting problems. – 2017. – № 6 (165). – Pp. 93-100. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/YNJMIG>.
5. Kulik, K.N. The role of protective afforestation in the fight against drought and desertification of agricultural landscapes / K.N. Kulik, A.I. Belyaev, A.M. Pugacheva. // Arid Ecosystems, 2023, vol. 29, No. 1(94), pp. 4-14. DOI: <https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-4-14>.
6. Mikhin, V.I. Forestry and reclamation features of protective plantings of Krasnodar Krai / V.I. Mukhin, E.A. Mikhina // The successes of modern natural science. 2021. No. 12. pp. 218-222. – DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37761>.
7. Rulev, A.S. The development of crop production at the regional level (on the example of the Volgograd region). / A.S. Rulev, A.M. Pugacheva // Forecasting problems. – 2019. – № 5 (176). – Pp. 112-119. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/WMRMRO>.
8. Rulev, A.S. Formation of a new agroforestry paradigm. / A.S. Rulev, A.M. Pugacheva // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. – 2019. – Vol. 89. – No. 10. – pp. 1044-1051. – DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-587389101044-1051>.
9. Rulev A.S., Ruleva O.V. Assessment of the current state of protective forest strips of various windage // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2022. Vol. 14, No5. pp. 152-165. DOI: <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2022-14-5-152-165>.
10. Strategy for the development of protective afforestation in the Russian Federation for the period up to 2025 /K.N. Kulik, A.L. Ivanov, A.S. Rulev [et al.]. – revised and supplemented. – Volgograd: Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meli - Access mode: <https://www.elibrary.ru/THPVGI>.
11. Sukhorukikh, Yu.I. Criteria for the selection of plus trees for protective afforestation / Yu. I. Sukhorukikh, S. G. Biganova, A. P. Glinushkin, L. L. Sviridova // New technologies. – 2023. – Vol. 19. – No. 1. – PP. 69-79. – DOI: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2023-19-1-69-79>.
12. Tables and models of growth and productivity of plantings of the main forest-forming breeds of northern Eurasia (regulatory reference materials). Ed. second, additional. / A. Z. Shvydenko, D. G. Shchepashchenko, S. Nilsson, Yu. I. Buluy – Moscow. 2006, 803 p. (in Russian). - Access mode: <https://www.elibrary.ru/QKQBEH>.
13. Tunyakin, V.D. Forest formation process in an extremely narrow protective forest strip / V. D. Tyunyakin, N. V. Rybalkina, L. M. Shenshin // Forestry Journal. – 2022. – T. 12. – № 2 (46). – Pp. 56-67. – Bibliogr.: pp. 65-67 (12 titles). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/5>.
14. Turusov, V. I. Experience of reconstructive logging in the forest strips of the Stone Steppe / V. I. Turusov, A. S. Chekanyshkin, A. A. Lepekhn // Izvestia of higher educational institutions. Forest Magazine. – 2019. – № 5(371). – Pp. 48-56. – DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.48>.
15. Tsarev, A.P. Forest plus plantings and criteria for their selection. /A.P. Tsarev, N.V. Laur // Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden. – 2019. – No. 132. – PP. 79-86. – DOI: <https://doi.org/10.25684/NBG.boolt.132.2019.10>.
16. Kryuchkov S.N. Breeding effect of selection methods (population, seed, and single-plant) at seed sites of various genetic levels in the Volgograd region / Kryuchkov S.N., Solonkin A.V., Solomentseva A.S., Egorov S.A., Gorbushova D.A. //E3S Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference “Ensuring the

Technological Sovereignty of the Agro-Industrial Complex: Approaches, Problems, Solutions” (ETSAIC2023). Yekaterinburg City, Russian Federation, 2023. С. 03001. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339503001>.

17. Kulik K.N. The role of protective afforestation in drought and desertification control in agro-landscapes / Kulik K.N., Belyaev A.I., Pugacheva A.M. *Arid Ecosystems*. 2023. Т. 13. № 1. С. 1-10. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079096123010079>.

18. Mikhin V.I. Agri-environmental role of protective forest plantations / V.I. Mikhin, E.A. Mikhina, V.V. Tanyukevich. //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International scientific and practical conference "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions" (Forestry-2019). – 2019. – С. 012066. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012066>.

19. Mikhin V.I., Tanyukevich V.V., Mikhina E.A. Growth and ameliorative role of protective plantation in conditions of forest-steppe zone IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions".2020; 595:012045. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012045>.

20. Sarah Taylor Lovell, Kiruba Krishnaswamy, Chung-Ho Lin, Nicholas Meier, Ronald S. Revord Andrew L. Thomas. Nuts and berries from agroforestry systems in temperate regions can form the foundation for a healthier human diet and improved outcomes from diet-related diseases // *Agroforestry System* (2023) 97:1347–1360 <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00858-8>.

### Сведения об авторах

✉ *Сухоруких Юрий Иванович* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет», ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Российская Федерация, 385000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5073-6102>, e-mail: [drsuchor@rambler.ru](mailto:drsuchor@rambler.ru).

*Биганова Светлана Герсановна* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности и прикладной информатики ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет», ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Российская Федерация, 385000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0581-3612> e-mail: [svetlanabiganowa@yandex.ru](mailto:svetlanabiganowa@yandex.ru).

### Information about the authors

✉ *Yuri I. Sukhorukikh* – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Leading Researcher of the Maykop State Technological University, Pervomayskaya str., 191, Maykop, Russian Federation, 385000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5073-6102> e-mail: [drsuchor@rambler.ru](mailto:drsuchor@rambler.ru)

*Svetlana G. Biganova* – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Security and Applied Informatics, Maykop State Technological University, Pervomayskaya str., 191, Maykop, Russian Federation, 385000, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0581-3612> e-mail: [svetlanabiganowa@yandex.ru](mailto:svetlanabiganowa@yandex.ru)

✉ – Для контактов | Corresponding author



Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/9>

УДК 630\*233:631\*618



## Динамика естественного зарастания травянистой растительностью насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при рекультивации гидроотвала Курской магнитной аномалии

Элла И. Трещевская<sup>1</sup>, [ehlht@yandex.ru](mailto:ehlht@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1454-4095>

Елена Н. Тихонова<sup>1</sup>, [tichonova-9@mail.ru](mailto:tichonova-9@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>

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

Светлана В. Трещевская<sup>1</sup>, [streshchevskaya@mail.ru](mailto:streshchevskaya@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2363-8512>

Николай И. Якимов<sup>2</sup>, [yakimov@belstu.by](mailto:yakimov@belstu.by) <https://orcid.org/0009-0007-0105-6822>

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

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

Для улучшения условий роста лесных культур на гидроотвале Березовый лог Курской магнитной аномалии (КМА) было проведено землевание плодородным слоем чернозема, снятым в процессе разработки месторождения. Анализ естественного зарастания гидроотвала необходим для комплексной оценки условий произрастания. Нами он осуществлялся до и после посадки на отвале лесных культур. До проведения землевания на песчаном отвале травянистая растительность не поселялась. Самозарастание началось после нанесения на поверхность гидроотвала плодородного слоя. Более активно зарастала северная часть отвала. Здесь было обнаружено 20 видов трав, относящихся к 10 семействам, в количестве 153 шт./м<sup>2</sup>. Через четыре года, в 6-летних культурах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), был отмечен более богатый флористический состав. Были зарегистрированы 30 видов травянистых растений, на долю малолетников из которых приходится 54 %. Травянистая растительность в этот период представлена в основном разнотравьем, почти полным отсутствием бобовых и небольшим участием злаков. В 40-летних культурах сосны было зарегистрировано 32 вида трав, относящихся к 13 семействам. Из них под пологом насаждения произрастают 11 видов. Возросло участие в травостое представителей семейств Злаковые и Сложноцветные. Травы являются конкурентом лесных культур за влагу и питательные вещества до возраста смыкания. К лесной рекультивации необходимо приступать сразу после нанесения плодородного слоя. К моменту массового появления сорняков они не будут представлять угрозу лесным культурам.

**Ключевые слова:** техногенно нарушенные земли, лесные насаждения, сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., гидроотвал, травянистая растительность, естественное зарастание, лесная рекультивация.

**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:** Динамика естественного зарастания травянистой растительностью насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при рекультивации гидроотвала Курской магнитной аномалии / Э. И. Трещевская, Е. Н. Тихонова, И. В. Голядкина, С. В. Трещевская, Н. И. Якимов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 117–130. – Библиогр.: с. 126–129 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/9>.


Поступила 04.10.2023. Пересмотрена 18.11.2023. Принята 18.11.2023. Опубликована онлайн 30.11.2023

## Dynamics of grass natural overgrowth in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands during reclamation of hydrodump of the Kursk magnetic anomaly

Ella I. Treschevskaya<sup>1</sup>, ehllt@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1454-4095>

Elena N. Tikhonova<sup>1</sup>, tikhonova-9@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>

Inna V. Golyadkina<sup>1</sup>, golyadkina@vgtu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-4532-3810>

Svetlana V. Treschevskaya<sup>1</sup>, streshchevskaya@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-2363-8512>

Nikolaj I. Yakimov<sup>2</sup>, yakimov@belstu.by  <https://orcid.org/0009-0007-0105-6822>

<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>Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus

### Abstract

To improve the conditions for the growth of forest stands on the Berezovy Log Kursk Magnetic Anomaly (KMA) has been conducted applying fertile topsoils, filmed during the development of the deposit. The analysis of the natural growth of the hydro dump is necessary for an integrated assessment of the growing conditions. We carried out it before and after planting on a dump of forest stands. Prior to the applying fertile topsoils, the herbaceous vegetation had not settled on the sand. Natural overgrowth began after the applying fertile topsoils on the surface of the hydro dumps. The northern part of the dump became more active in natural overgrowth. Twenty species of herbs belonging to 10 families were found here, numbering 153 pcs/m<sup>2</sup>. Four years later, in six-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands, a richer floristic composition was noted. Thirty species of herbaceous plants have been recorded, of which 54% are with short life-span. Herbaceous vegetation during this period is represented mainly by heterogeneous grass, almost total absence of legumes and small participation of *Gramineae*. In 40-year-old Scots pine stands, 32 species of grass on the edge and 11 species under the canopy of the plantation were considered, belonging to 13 families. The participation of members of the families of *Gramineae* and *Compositae* has increased. Herbs compete with forest stands for moisture and nutrients up to the age of clamping. It is concluded that forest reclamation should be started immediately after fertile application.

**Keywords:** *post-technogenic areas, forest stands, Scots pine, Pinus sylvestris* L., *hydrodump, herbaceous vegetation, natural overgrowth, forest reclamation*

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

**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:** Treschevskaya E. I., Tikhonova E. N., Golyadkina I. V., Treschevskaya S.V., Yakimov N. I. (2023). Dynamics of grass natural overgrowth in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands during reclamation of hydrodump of the Kursk magnetic anomaly. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 126-129 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/9>.

**Received** 04.10.2023. **Revised** 18.11.2023. **Accepted** 18.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

### Введение

Железистые кварциты являются одним из богатейших полезных ископаемых, добываемых в

нашей стране. Основной объем их добычи приходится на Курскую магнитную аномалию (КМА), расположенную в лесостепной зоне на территории

Белгородской, Курской и Орловской областей ЦФО РФ. Обратной стороной успешной деятельности горнодобывающей промышленности является возникновение нарушенных земель, на которых активно развиваются водная эрозия и дефляция, а также наносится ущерб ряду других важных экосистемных функций [16,21,22]. Наибольшее распространение эти экзогенные процессы имеют на отвалах как преобладающих формах рельефа в техногенных ландшафтах.

Роль растительности в восстановлении нарушенных земель – неопределима. Травы, кустарники и деревья могут появляться на нарушенных землях естественным, искусственным и комбинированным путями. В результате изменения природных условий на техногенных ландшафтах появляется неоднородная пионерная растительность. Естественное поселение растительности во многом зависит от видового разнообразия ненарушенных биогеоценозов, окружающих отвалы.

Самозарастание отвалов начинается с поселения на них травянистой растительности. Скорость самозарастания зависит от способа формирования отвала, его возраста, характера грунтосмеси и др. Медленнее всего зарастают гидроотвалы, сложенные песками и песчано-меловыми смесями [2,13].

Вопросами естественного зарастания отвалов, а также проблемами лесной рекультивацией отвалов КМА начали заниматься сотрудники НИИКМА имени Л. Д. Шевякова, Курского сельскохозяйственного института (сейчас Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И. И. Иванова), а также Воронежского лесотехнического института (сейчас Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова) с 1969 года. Результаты их исследований отражены в работах Бурыкина А. М., Пигорева И. Я. [6, 7], Стифеева А. И. [9], Трещевского И. В., Иванова Ф. Е. и Панкова Я. В. [11] и др. По итогам исследований этими авторами, а также рядом зарубежных [14,15,17,18] сделан вывод, что на естественное восстановление техногенно нарушенных ландшафтов полностью рассчитывать не приходится, т. к. оно протекает очень медленно. Для более эффективной защиты и восстановления

нарушенных земель необходимо проведение лесной рекультивации. При этом Белов Л.А. с соавторами (2021) подчеркивают, что рекультивация является дорогостоящим трудоемким мероприятием и при ее проведении всегда пытаются максимально использовать возможности природных экосистем к естественному восстановлению [1].

Осипенко Р.А. и др. (2020) в своей работе указывает, на то, что в целях минимизации затрат весьма актуально изучение формирования первичных сукцессий на нарушенных землях. Особого внимания заслуживают данные о формировании естественных травянистых фитоценозов [3].

Несмотря на значительное количество исследований по вопросам рекультивации в различных регионах нашей страны и за рубежом [12,19,20,23], необходимо изучение мероприятий по восстановлению в зависимости от конкретных условий образования и вида нарушенных земель [4].

Цель исследования – анализ динамики естественного зарастания гидроотвала железорудного месторождения КМА до и после проведения лесной рекультивации. Пионером естественного зарастания в условиях отвалов является травянистая растительность. В связи с этим для достижения поставленной цели решались следующие задачи: учёт видового состава трав и их количества в зависимости от экспозиции откосов упорной призмы гидроотвала до проведения лесной рекультивации и сравнительная характеристика с данными, полученными после проведения лесной рекультивации (культуры сосны различного возраста).

### Материалы и методы

#### *Предмет и объект исследований*

Объектами исследований послужили растительные группировки, сформировавшиеся на гидроотвале Березовый лог Лебединского горнообогатительного комбината Курской магнитной аномалии – 51°14'53"с.ш. 37°35'21" в.д.

Гидроотвал является самым большим отвалом в Белгородской области, его площадь составляет более 1100 га. Гидроотвал Березовый лог начал формироваться с 1965 года путем гидравлического намыва песка с небольшим содержанием мела в балку Березовый лог площадью 449 га.

Упорная призма представляет собой западную часть гидроотвала. Она сформирована отдельными уступами и представлена 3-4 призмами. Высота отвала составляет 40-46 м, крутизна откосов – до 30°.

В первый период формирования упорной призмы она состояла из чистого промытого песка. Закрепить поверхность отвала с помощью посева трав не представлялось возможным из-за дефляции песчаного грунта. Выращивание древесно-кустарниковой растительности было возможно только у основания отвала, в условиях лучшего увлажнения. Оно началось в 1972 г., но более активно шло в 1976-1977 гг.

В 1975-1976 гг. для улучшения условий роста лесных культур было проведено землевание снятым с черноземов в процессе разработки месторождения плодородным слоем мощностью от 30 до 80 см и более.

### *Сбор данных*

Зарастание отвалов естественным путем в первую очередь начинается с поселения на них травянистой растительности. Естественное зарастание травами изучалось нами до и после проведения лесной рекультивации на трех откосах упорной призмы.

Для изучения травянистой растительности закладывались по 5 учетных площадок размером 1 × 1 м на каждом из обследуемых участков. При описании напочвенного покрова указывался видовой состав, жизненная форма, общее проективное покрытие, экологическая группа и экологическая группа. Для каждого вида определялось обилие по шкале Друде.

### *Анализ данных*

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

## Результаты

Анализ естественного зарастания гидроотвала необходим для комплексной оценки условий произрастания, подбора местных видов травянистой растительности (при условии сельскохозяйственного освоения отвала), закрепления его откосов и повышения их противоэрозионной и противодефляционной устойчивости.

В первые годы после формирования гидроотвала в связи с бедностью грунта и значительной дефляцией травянистая растительность на нем не поселялась. Ее бурный рост начался после нанесения на поверхность гидроотвала плодородного слоя. Видовой состав трав и их количество приводится в табл. 1 на трех участках: в северной части упорной призмы (участок 1), в центральной (участок 2) и южной части (участок 3).

Из табл. 1 видно, что на различных участках процесс естественного зарастания упорной призмы травами протекал неодинаково. Более активное зарастание и развитие сорной растительности отмечалось на северном участке (участок 1), где плодородный слой наносился в первую очередь.

В этих условиях было учтено 153 растения на 1 м<sup>2</sup>, что на 20,5 % больше, чем в среднем на всем отвале. Это превышает количество растений на участках 2 и 3 соответственно в 1,5 и 1,2 раза. Здесь обнаружено самое большое разнообразие трав – 20 видов. Из наиболее распространенных встречаются: сурепка обыкновенная (22,9 %), марь белая (18,3 %), бодяк полевой (12,5 %) и молочай прутьевидный (10,5 %).

Такое бурное поселение трав в северной части упорной призмы объясняется значительным временем нахождения чернозема в буртах и сильной засоренностью его семенами трав, которое произошло за длительный период хранения. Поскольку на этом участке горнотехническая рекультивация проводилась в первую очередь, то чернозем брался с внешней стороны, где он был насыщен большим количеством семян сорных растений.

Видовой состав травянистой растительности на гидроотвале до посадки лесных культур

Table 1

Species composition of herbaceous vegetation on the hydro dumps after upper fertile layer application

Семейство   Familia	Вид травянистых растений   Species	Количество трав на участках, шт./м <sup>2</sup>   Number of herbs on plots, pcs. /m <sup>2</sup>			Среднее количество, шт./м <sup>2</sup>   Medium, pcs. /m <sup>2</sup>
		1	2	3	
1. Капустные (Крестоцветные) – <i>Cruciferae</i>	Сурепка обыкновенная – <i>Barbarea vulgaris</i> Ait. f.	35	34	56	41,7±12,4
2. Молочайные – <i>Euphorbiaceae</i>	Молочай прутьевидный – <i>Euphorbia virgata</i> Waldst. Et Kit.	16	18	14	16,0±2,0
3. Астровые (Сложноцветные) – <i>Compositae</i>	Бодяк полевой – <i>Cirsium arvense</i> L.	19	4	21	14,7±9,3
	Осот полевой – <i>Sonchus arvensis</i> L.	5	14	10	9,7±4,5
4. Амарантовые – <i>Amaranthaceae</i>	Марь белая – <i>Chenopodium album</i> L.	28	10	-	12,7±14,1
5. Зонтичные – <i>Umbelliferae</i>	Горичник горный – <i>Peucedanum oreoselinum</i> L.	8	-	13	7,0±6,5
6. Подорожниковые – <i>Plantaginaceae</i>	Льнянка обыкновенная – <i>Linaria vulgaris</i> Mill.	11	4	-	5,0±5,6
7. Бурачниковые – <i>Boraginaceae</i>	Липучка раскидистая – <i>Lappula squarrosa</i> Retz. Dumort.	3	7	4	4,7±2,1
8. Гречишные – <i>Polygonoideae</i>	Горец вьюнковый – <i>Fallopia convolvulus</i> L.	7	2	1	3,3±3,2
	Горец птичий – <i>Polygonum aviculare</i> L.	2	-	3	1,7±1,5
9. Яснотковые – <i>Lamiaceae</i>	Пикульник обыкновенный – <i>Galeopsis tetrahit</i> L.	9	-	-	3,0±5,2
10. Вьюнковые – <i>Convolvulaceae</i>	Вьюнок полевой – <i>Convolvulus arvensis</i> L.	2	3	-	1,7±1,5
	Другие виды (встречающиеся единично)	8	4	6	6,0±2,0
Всего растений на 1 м <sup>2</sup>		153	100	128	127±26,5

Собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

В центральной части упорной призмы (участок 2) было обнаружено 100 шт растений на 1 м<sup>2</sup>. Это самое незначительное количество трав, что на 21,3 % меньше, чем в среднем на всей плотине. Здесь были зарегистрированы 13 видов травянистых растений, что на 7 видов меньше, чем на участке 1. Самыми распространенными здесь являются сурепка (34,0 %), молочай (18,0 %), осот (14,0 %) и марь (10,0 %). На этом участке почти

отсутствует степная и полупустынная растительность. Такой процесс естественного зарастания на данном участке объясняется тем, что чернозем наносился со средней части бурта, которая в меньшей степени была засорена семенами трав.

В южной части гидроотвала (участок 3) было обнаружено 14 видов травянистых растений со средним количеством 128 штук на 1 м<sup>2</sup> или столько же, сколько в среднем на всей плотине. Наиболь-

ший процент приходится на сурепку (43,2 %), бодяк (16,4 %) и молочай (10,5 %). Этот участок был покрыт черноземом, в котором семян сорняков было больше, чем на участке 2 и меньше, чем на участке 1.

В связи с большим количеством атмосферных осадков сорная растительность после проведения землевания на гидроотвале получила бурное развитие. Всего было учтено 23 вида трав. Среди единично встречающихся видов были обнаружены татарник колючий (*Carduus nutans* L.), смолевка обыкновенная (*Silene vulgaris* (Moench) Garcke), подорожник большой (*Plantago major* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg.), мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.), чернокорень лекарственный (*Cynoglossum officinale* L.), сведа стелющаяся (*Suaeda prostrata* L.), живокость полевая (*Consolida regalis* S.F. Gray.), пупавка красильная (*Anthemis Tinctoria* L.), василек синий (*Centaurea cyanus* L.).

В процессе повторных исследований, проведенных через четыре года, был отмечен более богатый флористический состав. Возраст сосновых культур к этому времени составил 6 лет. Больших различий по количеству и видовому составу трав внутри насаждения и на опушке отмечено не было. Всего было зарегистрировано 30 видов трав (таблица 2). На долю малолетников приходится более половины – 54 %. Такой высокий процент однолетних растений свидетельствует о молодости образующихся ценозов, которые с течением времени, будучи неспособными конкурировать с многолетниками, уступят им место.

Среди многолетников преобладают осот полевой и бодяк полевой, на долю которых приходится от 10 до 20 %. Немного им уступают подорожник большой и пырей ползучий, составляющие в травостое до 10 %. Еще меньше в травостое встречается тысячелистник обыкновенный – 5 %, и совсем незначительное количество в напочвенном покрове имеют горчица полевая, качим высокий, ромашка непахучая и другие виды, на долю которых приходится всего от 1 до 2 %.

Среди малолетников преобладают смолевка обыкновенная, чертополох крючковатый, марь белая, липучка ежовая, составляющие до 5 % от общего травостоя. От 1 до 2 % образуют травяной покров

донник лекарственный, дурнишник обыкновенный, живокость полевая, горец узловатый и др.

Травянистая растительность в основном представлена разнотравьем, почти полным отсутствием бобовых и небольшим участием злаков (3 экземпляра или 10 % от всего травостоя). Анализ экологических групп свидетельствует о преобладании в напочвенном покрове мезофитов – 70 %, т.е. растений, живущих в условиях средней (достаточной) влажности почвы и воздуха.

Для оценки экосистемного и структурного разнообразия растительного покрова использовали общепринятое в ботанической науке соотношение эколого-ценотических групп (ЭЦГ) [5,8]. На рисунке 1 показано, что преобладающей ЭЦГ является лугово-степная группа, с большим долевым участием подгруппы влажных лугов. В 6-летних культурах сосны число эколого-ценотических групп увеличивается, в том числе за счет адвентивных и заносных видов. В 40-летнем сосновом насаждении основное ядро видов также составляет лугово-степная группа, но появляются уже типичные представители боровой группы, характерные для сосновых лесов.

Процесс заселения растительного черноземного слоя происходит сразу же после отсыпки. Так, если в первый год было зарегистрировано 20 видов трав, то на четвертый – 30 или в 1,5 раза больше. Степень проективного покрытия в первый год составляла до 40 %, на второй – 60-70 %, а на третий-четвертый – 90 %.

Надземная фитомасса трав зависит от увлажненности вегетационного периода. Во влажные годы она составляла 31-55 ц/га, что близко к естественным угодьям примыкающих территорий.

На противоэрозионную устойчивость плодородного слоя травы не оказывают существенного влияния, т.к. до 50 % представлены стержнекорневыми видами. Это указывает на плохие условия влагообеспеченности отвально-техногенных земель.

О характере развития корневых систем можно судить по корнено насыщенности плодородного слоя. В поверхностном слое мощностью 0-10 см на 1 м<sup>2</sup> насчитывается сосущих корней 951 штука. В слоях 10-20 см – в 1,4 раза меньше, а в слое 20-30 см – в 2,6 раза меньше, чем в поверхностном слое.

## Обсуждение

Известно, что сорная растительность потребляет из почвы до 1/3 влаги и питательных элементов. Она создает напряженный водный баланс и питательный режим на техногенно нарушенных

землях. Однако травы являются злостным конкурентом молодым лесным культурам до возраста их смыкания. В дальнейшем, после 6-летнего возраста, лесные насаждения способны сами оказывать влияние на развитие напочвенного покрова.

Таблица 2

Видовой состав травянистой растительности на гидроотвале после проведения лесной рекультивации (возраст сосны 6 лет)

Table 2

Species composition of herbaceous vegetation on the hydro dumps after the forest reclamation (age of pine 6 years)

Вид травянистых растений   Species	Биогруппа по продолжительности жизни   Life span	Характер корневой системы   Root systems	Экологическая группа   Ecological groups	Тип растительного Сообщества   Plant community	Доля от общего травостоя, %   Share of grass standing, %
1. Бодяк полевой – <i>Cirsium arvense</i> L.	многолетник	корнеотпрысковый	мезофит	разнотравье	10-20
2. Выюнок полевой – <i>Convolvulus arvensis</i> L.	многолетник	корнеотпрысковый	мезофит	разнотравье	до 1
3. Донник лекарственный – <i>Melilotus officinalis</i> L.	двулетник	стержнекорневой	мезофит	бобовые	до 2
4. Дурнишник обыкновенный – <i>Xanthium strumarium</i> L.	однолетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 1
5. Живокость полевая – <i>Delphinium consolida</i> L.	однолетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 1
6. Горчица полевая – <i>Sinapis arvensis</i> L.	многолетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 1
7. Горец узловатый – <i>Polygonum nodosum</i> L.	однолетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 2
8. Гречишка выюноквая (горец выюнковый) – <i>Fallopia convolvulus</i> L.	однолетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 2
9. Змееголовник тимьянолистный – <i>Dracocephalum thymiflorum</i> L.	однодвулетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	2-3
10. Кохия стелющаяся – <i>Kochia prostrata</i> L.	многолетник	стержнекорневой	ксерофит	разнотравье	до 1
11. Качим высочайший – <i>Gypsophila altissima</i> L.	многолетник	стержнекорневой	ксерофит	разнотравье	до 1
12. Липучка ежовая – <i>Lappula squarrosa</i> (Retz.)	многолетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 5
13. Льянка обыкновенная – <i>Linaria vulgaris</i> (Mill.)	многолетник	корнеотпрысковый	мезофит	разнотравье	до 1
14. Марь белая – <i>Chenopodium album</i> L.	однолетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 5
15. Мелколепестник однолетний - <i>Erigeron annuus</i> L.	однолетник	стержнекорневой	ксерофит	разнотравье	до 1
16. Одуванчик лекарственный – <i>Taraxacum officinale</i> Web. ex Wigg.	многолетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 2
17. Овес посевной – <i>Avena sativa</i> L.	однолетник	мочковатая	мезофит	злаки	до 10
18. Осот полевой – <i>Sonchus arvensis</i> L.	многолетник	корнеотпрысковый	мезофит	разнотравье	10-20
19. Подорожник большой – <i>Plantago major</i> L.	многолетник	корневищный	мезофит	разнотравье	до 10
20. Пырей ползучий – <i>Elytrigia repens</i> L.	многолетник	корневищный	мезофит	злаки	до 10
21. Пиккульник обыкновенный – <i>Galeopsis tetrahit</i> L.	однолетник	корневищный	мезофит	разнотравье	до 2
22. Польшь горькая – <i>Artemisia absinthium</i> L.	многолетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 2
23. Ромашка пахучая – <i>Matricaria matricarioides</i> (Less.)	многолетник	корневищный	мезофит	разнотравье	до 2

## Природопользование

24. Смолевка обыкновенная ( <i>Silene vulgaris</i> (Moench) Garcke)	двулетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 10
25. Тысячелистник обыкновенный – <i>Achillea millefolium</i> L.	многолетник	стержнекорневой	ксерофит, мезоксерофит	разнотравье	до 5
26. Фиалка полевая – <i>Viola arvensis</i> Murr.	однолетник	мочковатая	мезофит	разнотравье	до 1
27. Чистец болотный – <i>Stachys palustris</i> L.	многолетник	клубневый	мезофит	разнотравье	до 2
28. Чертополох крючочный – <i>Carduus hamulosus</i> Ehrh.	двулетник	стержнекорневой	мезофит	разнотравье	до 5
29. Щетинник сизый – <i>Setaria pumila</i> (Poir.) Schult.	однолетник	мочковатая	мезоксерофит, мезофит	злаки	до 1
30. Циклахена дурнишниковая – <i>Cyclachaena xanthifolia</i> Fresen.	однолетник	стержнекорневой	мезоксерофит, мезофит	разнотравье	до 1

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: own experimental data

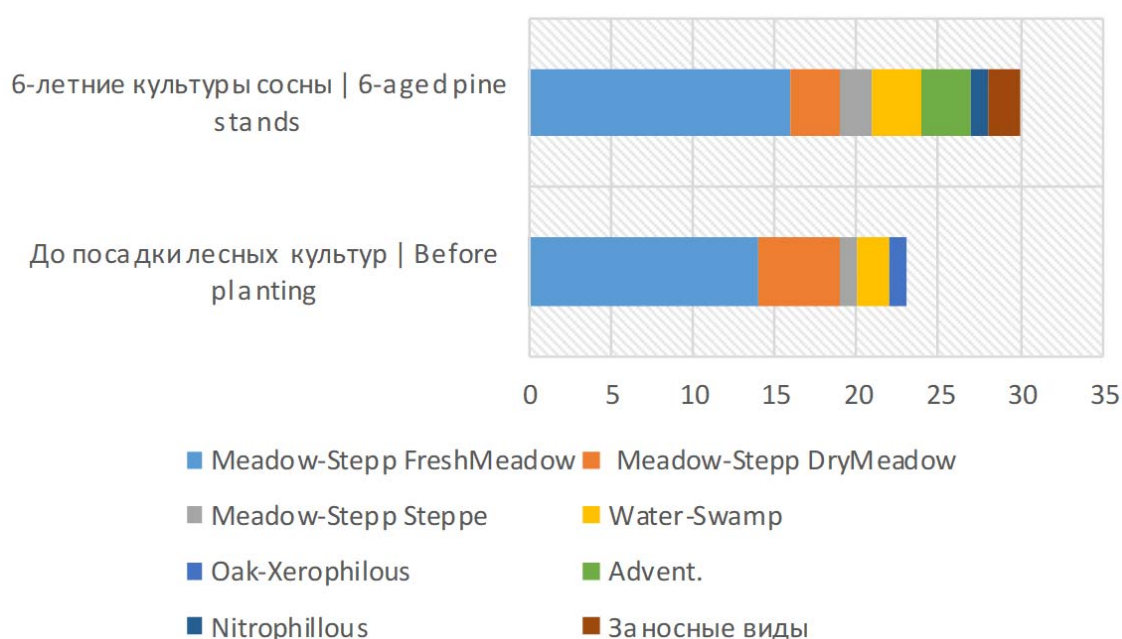


Рисунок 1. Соотношение видов разных эколого-ценотических свит в живом напочвенном покрове рекультивируемой территории гидроотвала Курской магнитной аномалии

Figure 1. The ratio of species of different ecological-coenotic formation in living ground cover of hydrodump reclaimed area, Kursk Magnetic Anomaly

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Как показывают наши наблюдения, живой напочвенный покров в 40-летних насаждениях сосны, заложенных на двухкомпонентном субстрате, достаточно интенсивно развит. При этом необходимо отметить, что на опушке обилие травянистых видов по шкале Друде составляет Soc (сплошь), а под пологом – Cop<sup>3</sup> (очень обильно).

Всего в 40-летних культурах сосны было зарегистрировано 32 вида трав, относящихся к 13

семействам. Из них под пологом насаждения произрастают 11 видов. Несмотря на то, что видовое разнообразие травянистых растений под пологом насаждения беднее, степень проективного покрытия составляет 75 %.

По мнению Телесниной В.М. и др. (2023) живой напочвенный покров является индикатором степени увлажнения [10]. Учитывая динамику количества видов травянистой растительности до и



после посадки лесных культур, а также степень проективного покрытия, следует отметить, что с ростом лесных культур водный режим техноземов становится более благоприятным. Средние показатели количества видов травянистых растений до и после проведения рекультивации гидроотвала показаны на рисунке 2. За 34 года общее количество видов травянистых растений на гидроотвале изменилось незначительно. Увеличилось количество злаков.

Появились такие виды как вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* L. Roth.), мятлик дубравный (*Poa nemoralis* L.), овсяница луговая

(*Festuca pratensis* Huds.), костер безостый (*Bromus inermis* Leys.) и другие представители семейства Злаковые (*Gramineae*). Возросло также количество видов разнотравной растительности, в том числе семейства Сложноцветные (*Compositae*). Были зарегистрированы пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.), цикорий обыкновенный (*Cichorium intybus* L.), полынь полевая (*Artemisia campestris* L.), пупавка светло-желтая (*Anthemis subtinctoria* Dobroc.) и др. Многие виды, такие как вьюнок полевой, горчица полевая, марь белая и др. были вытеснены культурами сосны из-за недостатка света под пологом насаждения.

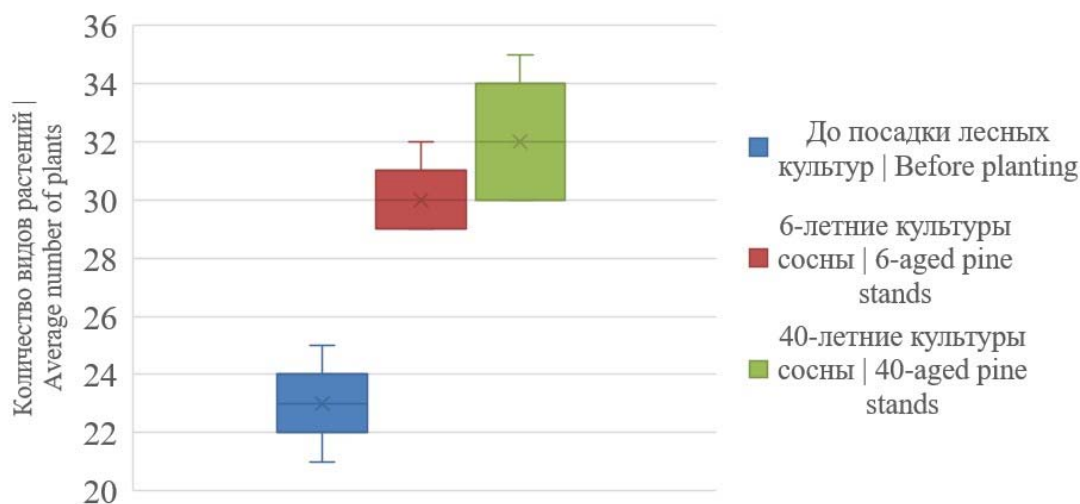


Рисунок 2. Сравнение количества видов травянистых растений на рекультивируемой территории гидроотвала Курской магнитной аномалии

Figure 2. Comparison of the number of herbaceous species on reclaimed areas of hydrodump, Kursk magnetic anomaly

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Травы являются сильным конкурентом лесным культурам за влагу и питательные вещества. Поэтому к лесной рекультивации необходимо приступать сразу после нанесения плодородного слоя.

## Выводы

1. На гидроотвалах, сложенных песками и песчано-меловыми смесями, в связи с бедностью грунта и значительной дефляцией травянистая растительность в первые годы не поселяется.

2. Для улучшения лесорастительных условий песчаных и песчано-меловых отвалов в нашей стране и за рубежом применяется землевание. В

результате формируются двухкомпонентные техноземы с поверхностным плодородным слоем (от 30 до 80 см).

3. Бурное появление сорной растительности начинается после нанесения на поверхность отвалов плодородного слоя в связи с большим содержанием в нем семян сорняков, а также их естественным распространением. Семенами трав плодородный слой, снятый с зональных почв в процессе разработки месторождения, насыщается при длительном хранении в буртах.

4. Видовое разнообразие травянистых растений изменяется в зависимости от возраста насаж-

дения. Если до проведения биологической рекультивации количество видов было минимально, то в первый год после землевания было зарегистрировано 20 видов. После проведения биологической рекультивации в 6-летних культурах сосны количество видов достигает уже 30.

5. В 40-летних культурах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), заложенных на двухкомпонентных техноземах, было зарегистрировано более 30 видов трав, относящихся к 13 семействам. Возросло участие в травостое представителей семейств Злаковые и Сложноцветные.

### Список литературы

1. Белов Л. А., Башегуров К. А., Залесов С. В., Зарипов Ю.В., Осипенко Р.А. Эффективность рекультивации выработанного песчаного карьера посевом сосны обыкновенной. Актуальные проблемы лесного комплекса. 2021;60:7-10. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47200106>
2. Малинина Т. А., Голядкина И. В., Тихонова Е. Н., Деденко Т. П. Оценка водно-физических свойств техногенных субстратов при биологической рекультивации отвалов КМА. Лесотехнический журнал. 2022;1(45): 44-55. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/4.
3. Осипенко Р. А., Осипенко А. Е., Зарипов Ю. В., Залесов С. В. Формирование естественных фитоценозов на выработанном карьере кирпичной глины как начальный этап дальнейшего лесоразведения. Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2020; № 3(60):111-117. DOI 10.34655/bgsha.2020.60.3.017.
4. Павленко Д. И., Малая М. С., Башегуров К. А., Осипенко Р. А., Белов Л. А. Эффективность лесохозяйственного направления рекультивации песчаных карьеров. Леса России и хозяйство в них. 2022;2(81):19-26. DOI 10.51318/FRET.2022.44.46.003
5. Попова В.Т., Попова А.А., Кондратьева А.К., Цепляев А.Н., Климчик Г.Я., Бельчина О.Г. Динамика напочвенного покрова в биотопах сосновых лесов при фрагментации, вызванной пожарами, в условиях лесостепной зоны. Лесотехнический журнал. 2023;1(49):49-52. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/3>.
6. Пигорев И. Я., Буланова Ж. А. Облесение отвалов вскрышных пород Курской магнитной аномалии (КМА). Охрана и рациональное использование лесных ресурсов : материалы X международного форума, г.Хэйхэ. Благовещенск. 2019:139-141. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38428959>
7. Пигорев И. Я. Учитель, перед именем твоим... (воспоминания о научном руководителе профессоре Александре Михайловиче Бурькине) . Современная экономика: актуальные проблемы, задачи и траектории развития : материалы II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Курск. 2021: 336-340. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47329792&pff=1>
8. Смирнова О.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э. Эколого-ценотические группы в растительном покрове лесного пояса Восточной Европы. Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. М.: Наука. 2004. Режим доступа: [https://www.impb.ru/eco/eco-ceno\\_plants\\_groups.php](https://www.impb.ru/eco/eco-ceno_plants_groups.php)
9. Стифеев А.И., Нагорная О.В. Основные направления преобразования техноземов в культурные ландшафты. Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2019; №3:28-34. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38249929>
10. Телеснина В.М., Семенюк О.В., Богатырев Л.Г. Подстилки и живой напочвенный покров биоценозов мелколиственных лесов Московской области. Почвоведение. 2023;7:801-814. DOI: 10.31857/S0032180X2260158X
11. Трещевская Э.И., Панков Я. В., Трещевская С. В., Тихонова Е. Н. Культуры сосны обыкновенной на деградированных и техногенно нарушенных землях ЦЧР : моногр. М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛУ». 2017., 133 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29307651>
12. Чибрик Т.С., Глазырина М. А., Филимонова Е. И., Лукина Н. В. Биоэкологический мониторинг флоры Коркинского железнодорожного отвала № 1 : материалы XV всероссийской научно-практической

конференции с международным участием. Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем. Киров. 2017:70-74. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30750528>

13. Dedenko T. P., S. V. Navalikhin. Ecological aspect of the industrial soils penetration resistance in wood recultivation of Kursk Magnetic Anomaly. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Jubilee Scientific and Practical Conference "Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)". Voronezh. 2018. DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012024.

14. Pietrzykowski M. Tree species selection and reaction to mine soil reconstructed at reforested post-mine sites: Central and eastern European experiences. Ecological Engineering. 2019;3:100012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoena.2019.100012>

15. Li X., Lei S., Cheng W. et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation in Jungar Banner of China during 2000–2017. J. Arid Land 2019;11:837-854. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40333-019-0067-9>

16. Liu S., Liu L., Li J., Zhou Q., Ji Y., Lai W., Long C. Spatiotemporal Variability of Human Disturbance Impacts on Ecosystem Services in Mining Areas. Sustainability 2022;14:7547. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14137547>

17. Macdonald S, Landhausser S., Skousen J., Franklin J., Frouz J., Hall S., Jacobs D., Quide S. Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions. New Forests. 2015:703-732. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-015-9506-4>

18. McMahan K, Simard S, Grayston S, Anglin L, Lavkulich L. Small-volume additions of forest topsoil improve root symbiont colonization and seedling growth in mine reclamation. Applied Soil Ecology. 2022 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104622>

19. Sarah N. Brown, Rebecca M. Swab. To Establish a Healthy Forest: Restoration of the Forest Herb Layer on a Reclaimed Mine Site," The American Midland Naturalist 2021;186(1):35-50. DOI: <https://doi.org/10.1674/0003-0031-186.1.35>

20. Soriaa R., Rodríguez-Berbela N., Ortegaa R., Lucas-Borjab M.E., Mirallesa I. Soil amendments from recycled waste differently affect CO<sub>2</sub> soil emissions in restored mining soils under semiarid conditions Journal of Environmental Management. 2021; 294:112894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112894>

21. Wu Z., Li H., Wang Y. Mapping annual land disturbance and reclamation in rare-earth mining disturbance region using temporal trajectory segmentation. Environ Sci Pollut Res 2021;28:69112-69128. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15480-3>

22. Yang W., Mu Y., Zhang W., Wang W., Liu J., Peng J., Liu X., He T. Assessment of Ecological Cumulative Effect due to Mining Disturbance Using Google Earth Engine. Remote Sens. 2022;14:4381. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14174381>

23. Wang Z., Lechner A.M., Yang Y., Baumgartl T., Wu J. Mapping the cumulative impacts of long-term mining disturbance and progressive rehabilitation on ecosystem services. The Science of the total environment. 2020;717: 137214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137214>

### References

1. Belov L. A., Bashegurov K. A., Zalesov S. V., Zaripov YU.V., Osipenko R.A. Effektivnost' rekul'tivacii vyrabotannogo peschanogo kar'era posevom sosny obyknovnoy [Efficiency of recultivation of the Scots pine sand quarry] Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa =Actual problems of the forest complex.2021; 60:7-10 (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47200106>

2. Malinina T.A., Golyadkina I.V., Tihonova E.N., Dedenko T.P. Ocenka vodno-fizicheskikh svoystv tekhnogennykh substratov pri biologicheskoy rekul'tivacii otvalov KMA. [Assessment of water-physical properties of technogenic substrates during biological recovery of KMA dumps]. Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2022; 1(45):44-55. (In Russ.). DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/4.

3. Osipenko R. A., Osipenko A. E., Zaripov YU. V., Zalesov S. V. Formirovanie estestvennyh fitocenozov na vyrabotannom kar'ere kirpichnoj gliny kak nachal'nyj etap dal'nejshego lesorazvedeniya [Formation of natural phytocenosis on the developed quarry brick clay as an initial stage of further afforestation]. Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii im. V.R. Filippova = Bulletin of Buryat State Agricultural Academy. V.R. Filippov.2020; 3(60):111-117. (In Russ.). DOI 10.34655/bgsha.2020.60.3.017.

4. Pavlenko D. I., Malaya M. S., Bashegurov K. A., Osipenko R.A., Belov L.A. Effektivnost' lesohozyajstvennogo napravleniya rekultivacii peschanyh kar'erov [The efficiency of forestry direction of sand quarrying recultivation] Lesa Rossii i hozyajstvo v nih = Russian forests and their economy. 2022; 2(81): 19-26. (In Russ.). DOI 10.51318/FRET.2022.44.46.003

5. Popova V.T., Popova A.A., Kondrat'eva A.K., Ceplyaev A.N., Klimchik G.YA., Bel'china O.G. Dinamika napochvennogo pokrova v biotopah sosnovyh lesov pri fragmentacii, vyzvannoj pozharemi, v usloviyah lesostepnoj zony [Dynamics of the pine forest ground cover in the forest-steppe zone after fires]. Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2023;1(49):49-52. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/3>.

6. Pigorev I. YA., Bulanova ZH. A. Oblesenie otvalov vskryshnyh porod Kurskoj magnitnoj anomalii (KMA) [Afforestation of Open Rock Piles Kursk Magnetic Anomaly (KMA)]. Ohrana i racional'noe ispol'zovanie lesnyh resursov : materialy X mezhdunarodnogo foruma, g.Hejhe = Forest Conservation & Management: Proceedings of the X International Forum, Heihe, (In Russ.). 2019. pp139 -141. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38428959>

7. Pigorev I. YA. Uchitel', pered imenem tvoim... (vospominaniya o nauchnom rukovoditele professore Aleksandre Mihajloviche Burykine) [Teacher, in front of your name... (memoirs about the scientific supervisor Professor Alexander Burykin)] Sovremennaya ekonomika: aktual'nye problemy, zadachi i traektorii razvitiya : materialy II Vserossij-skoj (nacional'noj) nauchno-prakticheskoj konferencii = Modern Economy: Actual Problems, Tasks and Development Trajectories: Materials of the 2nd All-Russian (National) Scientific and Practical Conference, Kursk, (In Russ.). 2021. pp.336-340. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47329792&pf=1>

8. Smirnova O.V., Hanina L.G., Smirnov V.E. Ekologo-cenoticheskie gruppy v rastitel'nom pokrove lesnogo poyasa Vostochnoj Evropy. Vostochnoevropskie lesa: istoriya v golocene i sovremennost' [Ecological and coenotic groups in the vegetation cover of the forest belt of Eastern Europe. Eastern European forests: history in the Holocene and present]. 2004. (In Russ.). URL: [https://www.impb.ru/eco/eco-ceno\\_plants\\_groups.php](https://www.impb.ru/eco/eco-ceno_plants_groups.php)

9. Stifeev A.I., Nikitina O.V., Nagornaya O.V. Osnovnye napravleniya preobrazovaniya tekhnozemov v kul'turnye landshafty [Main directions of technosomes' transformation into cultural landscapes] Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2019; 3:28-34. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38249929>

10. Telesnina V.M., Semenyuk O.V., Bogatyrev L.G. Podstilki i zhivoj napochvennyj pokrov biogeocenozov melkolistvennyh lesov Moskovskoj oblasti. [The litters and living ground cover as informational characteristics of biogeocenoses for Moscow oblast small-leaved forests] Pochvovedenie = Eurasian Soil Science. 2023;7:801-814. DOI: 10.31857/S0032180X2260158X

11. Treshchevskaya E. I., Pankov YA. V., Treshchevskaya S. V., Tihonova E. N. Kul'tury sosny obyknovvennoj na degradirovannyh i tekhnogenno narushennyh zemlyah CCHR [Scots pine crops on degraded and technogenically disturbed HRC lands]. Voronezh. (In Russ.). 2017. 133p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29307651>

12. CHibrik T.S., Glazyrina M. A., Filimonova E. I., Lukina N. V. Bioekologicheskij monitoring flory Korkinskogo zheleznodorozhnogo otvala № 1 [Bio-ecological monitoring of the flora of the Corkin railway pile 1]. Materialy HV vsersijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem. Biodiagnostika sostoyaniya prirodnyh i prirodno-tekhnogennyh system = Materials of the XV All-Russian scientific-practical conference with international participation. Biodiagnomy of the state of natural and natural-technogenic systems. Kirov. (In Russ.). 2017.pp. 70-74. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30750528>

13. Dedenko, T. P. Ecological aspect of the industrial soils penetration resistance in wood recultivation of Kursk Magnetic Anomaly / T. P. Dedenko, S. V. Navalikhin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science :

International Jubilee Scientific and Practical Conference "Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (FORESTRY-2018)", Voronezh, 2018. DOI 10.1088/1755-1315/226/1/012024.

14. Pietrzykowski M. Tree species selection and reaction to mine soil reconstructed at reforested post-mine sites: Central and eastern European experiences. *Ecological Engineering*. 2019;3:100012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoena.2019.100012>

15. Li X., Lei S., Cheng W. et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation in Jungar Banner of China during 2000–2017. *J. Arid Land* 2019;11:837-854. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40333-019-0067-9>

16. Liu S., Liu L., Li J., Zhou Q., Ji Y., Lai W., Long C. Spatiotemporal Variability of Human Disturbance Impacts on Ecosystem Services in Mining Areas. *Sustainability* 2022;14:7547. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14137547>

17. Macdonald S, Landhausser S., Skousen J., Franklin J., Frouz J., Hall S., Jacobs D., Quide S. Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions. *New Forests*. 2015:703-732. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-015-9506-4>

18. McMahan K, Simard S, Grayston S, Anglin L, Lavkulich L. Small-volume additions of forest topsoil improve root symbiont colonization and seedling growth in mine reclamation. *Applied Soil Ecology*. 2022 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104622>

19. Sarah N. Brown, Rebecca M. Swab. To Establish a Healthy Forest: Restoration of the Forest Herb Layer on a Reclaimed Mine Site," *The American Midland Naturalist* 2021;186(1):35-50. DOI: <https://doi.org/10.1674/0003-0031-186.1.35>

20. Soriaa R., Rodríguez-Berbela N., Ortegaa R., Lucas-Borjab M.E., Mirallesa I. Soil amendments from recycled waste differently affect CO<sub>2</sub> soil emissions in restored mining soils under semiarid conditions *Journal of Environmental Management*. 2021; 294:112894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112894>

21. Wu Z., Li H., Wang Y. Mapping annual land disturbance and reclamation in rare-earth mining disturbance region using temporal trajectory segmentation. *Environ Sci Pollut Res* 2021;28:69112-69128. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15480-3>

22. Yang W., Mu Y., Zhang W., Wang W., Liu J., Peng J., Liu X., He T. Assessment of Ecological Cumulative Effect due to Mining Disturbance Using Google Earth Engine. *Remote Sens*. 2022;14:4381. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14174381>

23. Wang Z., Lechner A.M., Yang Y., Baumgartl T., Wu J. Mapping the cumulative impacts of long-term mining disturbance and progressive rehabilitation on ecosystem services. *The Science of the total environment*. 2020;717: 137214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137214>

### Сведения об авторах

*Трещевская Элла Игоревна* – доктор с.-х. наук, проф. кафедры лесных культур, селекции и лесомелиорации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1454-4095>, e-mail: [ehlht@yandex.ru](mailto:ehlht@yandex.ru)

*Тихонова Елена Николаевна* – кандидат биол. наук, зав. кафедрой 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/0000-0002-9039-9822>, e-mail: [tichonova-9@mail.ru](mailto:tichonova-9@mail.ru)

✉ *Голядкина Инна Вячеславовна* – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры 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)

*Трещевская Светлана Викторовна* – кандидат с.-х. наук, преподаватель кафедры 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/0000-0002-2363-8512>, e-mail: [streshchevskaya@mail.ru](mailto:streshchevskaya@mail.ru)

*Якимов Николай Игнатьевич* – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры лесных культур и почвоведения УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, д. 13а, г. Минск, Республика Белоруссия, 220006, <https://orcid.org/0009-0007-0105-6822>, e-mail: [yakimov@belstu.by](mailto:yakimov@belstu.by)

### Information about the authors

*Treshevskaya Ella Igorevna* – Dr. Sci (Agric.), Professor, Silviculture, Selection and Forest melioration Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1454-4095>, e-mail: [ehlht@yandex.ru](mailto:ehlht@yandex.ru)

*Tikhonova Elena Nikolaevna* – Cand. Sci (Biol.), Head of 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/0000-0002-9039-9822>, e-mail: [tikhonova-9@mail.ru](mailto:tikhonova-9@mail.ru)

✉ *Golyadkina Inna Vyacheslavovna* – 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@vgtu.ru](mailto:golyadkina@vgtu.ru)

*Treshevskaya Svetlana Viktorovna* – Cand. Sci (Agric), 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: <http://orcid.org/0000-0002-2363-8512>, e-mail: [streshchevskaya@mail.ru](mailto:streshchevskaya@mail.ru)

*Yakimov Nikolaj Ignat'evich* – Cand. Sci (Agric), Associate Professor, Forest Crops and Soil Science Department, Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, Republic of Belarus, 220006, <https://orcid.org/0009-0007-0105-6822>, e-mail: [yakimov@belstu.by](mailto:yakimov@belstu.by)

✉- Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10>

УДК 630\*3 : 621.866-82



## Влияние податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора

Иван Д. Евсиков<sup>1</sup>✉, [evsfan1997@gmail.com](mailto:evsfan1997@gmail.com), 0009-0007-3388-3275

Дмитрий С. Богданов<sup>1</sup>, [bogdanov\\_s69@mail.ru](mailto:bogdanov_s69@mail.ru) 0000-0003-4179-8189

Алина В. Попикова<sup>1</sup>, [poalinka@mail.ru](mailto:poalinka@mail.ru) 0000-0002-9387-4254

Андрей В. Конюхов<sup>1</sup>, [akoniukhov@gmail.com](mailto:akoniukhov@gmail.com) 0000-0002-1828-3673

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

Проведен анализ исследований динамики гидропривода технологических машин и оборудования. Установлено, что вопросам влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность отдельных механизмов уделено недостаточно внимания. Цель работы – оценка влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора при совершенствовании компоновки гидроцилиндров на основе математического моделирования. Представлена математическая модель движения стрелы манипулятора с учетом сил инерции и расходов рабочей жидкости. Сделана модельная оценка динамики гидропривода и давления рабочей жидкости при повороте стрелы лесного манипулятора. Задача решалась в рамках работы над программным комплексом для исследований скачков давления рабочей жидкости в гидроцилиндрах. Результаты оценки показали, что оптимальные точки присоединения гидроцилиндра к стреле и к поворотной колонне зависят от коэффициента податливости. В вычислительном эксперименте по определению оптимальной компоновки гидроцилиндра механизма подъема стрелы манипулятора по критерию минимизации скачков давления рабочей жидкости были получены оптимальные точки присоединения гидроцилиндра к стреле  $b_1 = 0.9$  м и к поворотной колонне  $OB = 0.7$  м, а при учете коэффициента податливости были получены новые оптимальные точки присоединения гидроцилиндра:  $b_1 = 1$  м,  $OB = 0.85$  м. Для интерпретации модели и уточнения влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора необходимо проведение стендовых испытаний.

**Ключевые слова:** гидропривод, динамическая нагруженность, коэффициент податливости, моделирование.

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

**Благодарности:** Авторы выражают признательность заведующему кафедрой общей и прикладной физики доценту Евсиковой Наталье Юрьевне и доценту кафедры общей и прикладной физики Камаловой Нине Сергеевне за консультации при подготовке материалов для статьи.


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


**Для цитирования:** Влияние податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора / И. Д. Евсиков, Д. С. Богданов, А. В. Попикова, А. В. Конюхов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 131–142. – Библиогр.: с. 138–141 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10>.


Поступила 17.08.2023 Пересмотрена 16.11.2023 Принята 17.11.2023 Опубликовано онлайн 30.11.2023


Article

## Influence of Hydraulic Drive Compliance on Dynamic Loading of Forest Manipulator Mechanisms

Ivan D. Evsikov<sup>1</sup>✉, evsfan1997@gmail.com,  0009-0007-3388-3275

Dmitry S. Bogdanov<sup>1</sup>, bogdanov\_s69@mail.ru  0000-0003-4179-8189

Alina V. Popikova<sup>1</sup>, poalinka@mail.ru  0000-0002-9387-4254

Andrey V. Konyukhov<sup>1</sup>, akoniukhov@gmail.com  0000-0002-1828-3673

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

### Abstract

The article analyzes the research into the dynamics of the hydraulic drive of technological machines and equipment. It has been established that insufficient attention has been paid to the issues of the influence of hydraulic drive compliance on the dynamic loading of individual mechanisms. The purpose of the work is to assess the effect of hydraulic drive compliance on the dynamic loading of forest manipulator mechanisms when improving the layout of hydraulic cylinders based on mathematical modeling. A mathematical model of the movement of the manipulator boom is presented, taking into account the forces of inertia and the flow rate of the working fluid. A model estimate of the dynamics of the hydraulic drive and the pressure of the working fluid was made when the boom of the forest manipulator is turned. The problem was solved as part of the work on a software package for studying the pressure jumps of the working fluid in hydraulic cylinders. The evaluation results showed that the optimal points of attachment of the hydraulic cylinder to the boom and to the rotary column depend on the compliance coefficient. In a computational experiment to determine the optimal layout of the hydraulic cylinder of the lifting mechanism of the manipulator boom, according to the criterion of minimizing the pressure surges of the working fluid, the optimal points of attachment of the hydraulic cylinder to the boom  $b_1 = 0.9$  m and to the rotary column  $OB = 0.7$  m were obtained, and when taking into account the compliance coefficient were new optimal hydraulic cylinder attachment points were obtained:  $b_1 = 1$  m,  $OB = 0.85$  m. To interpret the model and clarify the effect of hydraulic drive compliance on the dynamic loading of forest manipulator mechanisms, it is necessary to conduct bench tests.

**Key words:** hydraulic drive, dynamic loading, compliance coefficient, modeling.

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

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to the head of the Department of General and Applied Physics, Associate Professor Evsikova Natalya Yurievna and Associate Professor of the Department of General and Applied Physics Kamalova Nina Sergeevna for consultations in preparing materials for the article.

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

**For citation:** Evsikov I. D., Bogdanov D. S., Popikova A. V., Konyukhov A. V. (2023). Influence of Hydraulic Drive Compliance on Dynamic Loading of Forest Manipulator Mechanisms. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 131-142 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/10>.

**Received** 17.08.2023. **Revised** 16.11.2023. **Accepted** 17.11.2023. **Published online** 30.11.2023.



### Введение

В настоящий момент на лесопромышленных предприятиях Российской Федерации наиболее остро встает проблема импортозамещения. Поэтому задача разработки эффективной техники для лесного комплекса является актуальной. Среди разнообразия критериев эффективности любой технической системы (металлоемкости, себестоимости, надежности и т.д.), на наш взгляд, особо выделяется надежность и энергоемкость, а возможным решением может стать разработка энергосберегающих демпфирующих узлов, которые снижают динамическую нагруженность и энергозатраты. Податливость гидропривода по физической сущности является величиной, обратной объемной жесткости. Разработка возможных энергосберегающих демпфирующих узлов при исследовании динамики подъема стрелы лесных манипуляторов, которыми оборудованы современные погрузочно-транспортные машины, может значительно повысить как надежность машин в целом, так и эффективность проводимых работ.

Известно, что в рабочих процессах лесотранспортных машин манипуляторного типа, осуществляющих вывоз сортиментов и хлыстов при проведении сплошных рубок или рубок лесоводственного ухода, возникают большие динамические нагрузки [1-4]. На первом этапе проектирования механизмов манипуляторов необходимо обосновать компоновку и параметры гидропривода. Для обоснования, в свою очередь, целесообразно разработать физико-математическую модель рабочего процесса гидропривода манипулятора, эффективность которого будет функционально или опосредованно меняться при изменении компоновки гидроцилиндров.

При эксплуатации лесных гидроманипуляторов из-за высокой динамической нагруженности при низких температурах воздуха отказы рукавов высокого давления составляют 29.7-56%, а гидроцилиндров 14.0-24.1% [5]. Предложен новый метод диагностики гидроцилиндров с учетом предельного значения логарифмического декремента затухания колебаний рабочей жидкости, который уменьшается при износе уплотнений до величины  $\delta = 0.533$ , при которой необходим ремонт гидроцилиндра.

Для снижения энергозатрат при эксплуатации силовой установки нефтедобывающего комплекса [6] создана конструкция гибридного электрогидроцилиндра рекуперативного действия. Поступательное движение поршня гидроцилиндра под действием силы тяжести рабочего оборудования станка-качалки за счет винтовой передачи превращается во вращательное движение ротора электрогенератора, встроенного в гильзу гидроцилиндра. На основании математического моделирования получены амплитудно-фазовые характеристики давления рабочей жидкости для стандартного гидроцилиндра и электрогидроцилиндра. Анализ графиков переходных процессов показывает, что при использовании стандартного гидроцилиндра переходный процесс длится около 6 с, а при использовании электрогидроцилиндра с рекуперацией энергии – около 3 с, при этом эффективность силового привода повышается на 23%.

Для рекуперации потенциальной энергии одноковшового фронтального погрузчика Амкодор (Беларусь) предлагается энергосберегающее устройство, включающее две пружины кручения, установленные между рамой и стрелой [7, 8]. Выбор пружин кручения произведен из условия, чтобы они уравнивали силу тяжести погрузочно-оборудования без груза. Предлагаемое энергосберегающее устройство, позволяет снизить энергозатраты на 26%.

В работе [9] проведены исследования по экономии энергии в процессе эксплуатации гидравлического пресса с насосно-аккумуляторным источником питания. Разработана программа расчёта математической модели трёхскоростного привода возвратно-поступательного движения гидравлического пресса на базе блока решений дифференциальных уравнений в среде SimInTech. Приведены графики перемещения и скорости поршня гидроцилиндра, из которых видно, что перемещение поршня начинается через 1.4 с после момента включения насоса. В этот момент скорость поршня достигает величины 0.9 м/с, а затем выходит на уровень среднего значения 0.4 м/с. При включении в работу гидронасоса давление рабочей жидкости на выходе гидронасоса и на входе гидроаккумулятора возрастает до величины 15 МПа за время 0.2 с по мере

зарядки гидроаккумулятора. Подключение в гидросистему автомата разгрузки насоса позволяет поднять КПД системы питания до 27%.

Разработан стенд для ресурсных испытаний плунжерных гидроцилиндров с рекуперацией энергии, в котором один гидроцилиндр выполняет функцию гидродвигателя и воздействует на второй гидроцилиндр, выполняющий функцию гидронасоса, через передаточное звено в виде коромысла [10]. Проведены исследования влияния различных конструктивных и функциональных параметров стенда на коэффициент эффективности. Установлено, что давление настройки клапана нагружения и угловая скорость вращения вала влияют на коэффициент эффективности в незначительной степени. Поэтому при проектировании гидромеханической системы стенда учитывались величины рабочих объемов гидронасоса и гидромотора, а также передаточное число механизма.

В ВГЛТУ разработан и изготовлен лабораторный стенд для исследования рабочих процессов гидроманипулятора [11]. Моделирование гидравлической системы стенда проводилось в соответствии с математической моделью, включающей уравнение движения стрелы и уравнение расходов жидкости с учетом упругодемпфирующего устройства с гидроаккумулятором. Проведены лабораторные испытания механизма подъема стрелы с использованием тензометрических датчиков типа ПД-100 и тензолаборатории ZETLAB ZET 058.

В работе [12] рассмотрены линеаризованные математические модели циклового гидропривода лесного манипулятора с механическим управлением, основанные на разложении в ряд Тейлора с точностью до величин первого порядка малости. Определены диапазоны устойчивости гидравлического следящего привода с учетом коэффициента скольжения, параметров золотника и коэффициента усиления по расходу.

В работе [13], чтобы получить линеаризованные математические модели, производится разрешение относительно старшей производной, благодаря чему система распадается на равенства в подпространствах уменьшающихся размерностей. Такой способ решения носит название метода каскадной декомпозиции. Этот метод был успешно

применен, например, при исследовании возмущений линейно алгебро-дифференциального уравнения, вызываемых наличием малого параметра.

В работе [14] проведены экспериментальные исследования динамики гидропривода манипулятора сучкорезной машины ЛП-30Б на стенде «Гидравлический перегрузочный манипулятор» СГУ-ГПМ. Установлена зависимость повышения динамических свойств гидропривода сучкорезной машины от внешней нагрузки. Анализ характеристик случайного процесса в разработанной математической модели проводился с использованием методов статистической динамики. В гидроприводе имеются элементы с нелинейной характеристикой упругости, которые были учтены в математической модели.

В статье [15] разработана методика оптимального проектирования лесных гидроманипуляторов, эксплуатируемых в условиях низких и сверхнизких температур, также применяемых для аварийно-спасательных и других неотложных работ. Каждое включение-выключение гидропривода (время переключения золотника для серийных распределителей составляет порядка 0.10-0.15 с) вызывает импульсное изменение потока рабочей жидкости в гидроприводе от 0 до номинальной подачи насоса и наоборот, что сопровождается значительными динамическими нагрузками в пуск-тормозных режимах. Обоснована структура методики оптимального проектирования манипулятора транспортно-технологических машин, дан порядок расчет параметров гидроуправления, разработаны алгоритмы оптимизации компоновки по критериям минимизации металлоемкости, полезного объема гидроцилиндра, энергозатрат.

В гидроприводах лесных манипуляторов широкое применение нашли шестеренчатые насосы с внешним зацеплением [16]. Авторами разработаны модели шестеренчатого насоса с внешним зацеплением в среде 3D-моделирования Ansys и выполнен анализ его гидродинамики. В результате сравнительного анализа гидродинамики шестеренчатых и кулачковых насосов, установлено, что у шестеренчатых насосов более высокая разницы давлений в нагнетательной и всасывающих полостях, что приводит к повышенному износу опор, в

отличие от кулачковых, где давление жидкости при перекачке распределяется равномернее.

Разработана методика расчета металлоконструкции манипулятора [17] на динамические нагрузки, которая представляет собой плоскую статически определимую конструкцию с массами, распределенными по узлам консоли. Расчет представлен в аналитической форме. В алгоритме определения зависимости первой частоты колебаний конструкции от числа панелей используются операторы системы символьной математики Maple и формула Донкерлея. Решение имеет высокую точность по сравнению с численным методом решения задачи.

В работе [18] представлена безразмерная математическая модель динамики приводного комплекса в виде системы управления двумя гидроприводами для поднятия груза в параллельном режиме. В системе управления применяются три гидравлических распределительных устройства, которые регулируют скорость подъема (и/или опускания) объекта и поддержание его горизонтального положения с учетом возмущающих факторов различной природы. Величина отклонения объекта от горизонтального положения оценивается разностью перемещений штоков гидроприводов от базового положения в данный момент времени.

В работе [19] исследована динамика гидропривода ротора многоковшового роторного экскаватора с применением систем автоматического управления высотным положением рабочего оборудования за счет изменения давления рабочей жидкости в гидроцилиндре подъема и опускания ротора. Составлена система уравнений по Лапласу и структурная схема математической модели объекта управления.

Анализ приведенных выше работ по исследованию динамики гидроприводов технологических машин показал, что вопросам влияния коэффициента податливости гидропривода на динамическую нагруженность отдельных механизмов уделено недостаточно внимания исследователей.

Целью настоящей работы является оценка влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора ЛВ-184А при совершенствовании компо-

новки гидроцилиндров на основе математического моделирования.

## Материалы и методы

Расчетная схема механизма подъема стрелы манипулятора, соответствующая патенту на изобретение [20], представлена на рисунке 1.

Математическая модель движения стрелы манипулятора с учетом сил инерции и расходов рабочей жидкости имеет вид [21]:

$$\begin{aligned} QK_t &= \frac{\pi d^2}{4} b_1 \sin \beta \frac{d\varphi}{dt} + a_y P + K_p \frac{dP}{dt}, \\ (J_c + ml^2) \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= \\ &= \frac{\pi d^2}{4} P b_1 \sin \beta - g(ml + m_c l_n) \cos(\varphi - \varphi_n), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/с;

$K_t$  – коэффициент нарастания подачи насоса;

$J_c$  – момент инерции стрелы относительно шарнира  $O$ , кг·м<sup>2</sup>;

$m$  – масса пачки сортиментов, кг;

$a_y$  – коэффициент утечек жидкости, м<sup>5</sup>/(Н·с);

$P$  – давление в гидроприводе, Па;

$d$  – диаметр гидроцилиндра, м;

$m_c$  – масса стрелы, кг;

$K_p$  – коэффициент податливости гидропривода, м<sup>3</sup>/Па, определяется по эмпирической формуле:

$$K_p = \frac{10^{-5}}{7,28 \cdot P + 106}. \quad (2)$$

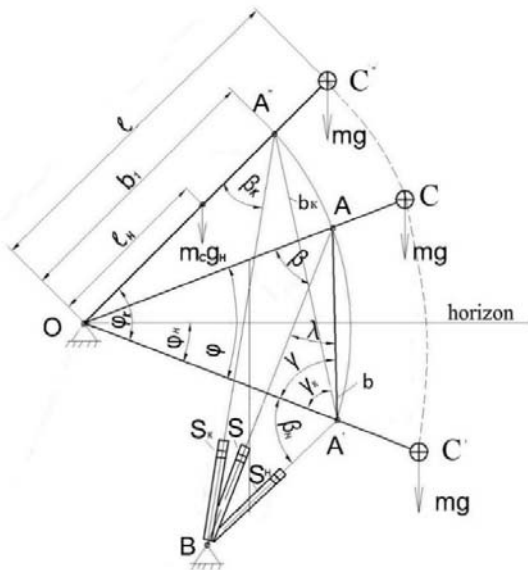


Рисунок 1. Расчетная схема компоновки гидроцилиндра

Figure 1. Calculation diagram of the layout of the hydraulic cylinder

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

### Результаты и обсуждение

Ввиду сложности исследуемой технической системы такая задача может быть решена методами комплексного анализа. Поскольку результатом является определение параметров компоновки лесного манипулятора, алгоритм работы программного комплекса необходимо осуществлять в рамках формализованного моделирования. Такие модели строятся как формальные (физико-математические) и реализуются в виде логико-лингвистических моделей, в которых искомые параметры определяются в результате вычислительного эксперимента методом оптимизации некоторого критерия. При этом в эксперименте используются технологии так называемых «мягких вычислений», в которых определяемые и задаваемые параметры имеют определенную, но произвольную величину в пределах интервала принадлежности. Поэтому определение этих интервалов, по сути, и является основной задачей вычислительного эксперимента. В работе предлага-

ется определить интервал принадлежности для коэффициента податливости гидропривода при определении оптимального расположения гидроцилиндра.

Для вычислительного эксперимента динамика давления  $P(t)$  в гидроприводе моделировалась как решение уравнения расхода рабочей жидкости:

$$K_t Q = \frac{\pi d^2}{4} b_1 \sin \beta \omega + a_y P + K_p \frac{dP}{dt}. \quad (3)$$

Уравнение (3) содержит две величины, определяемые в текущий момент времени  $t$ : угловую скорость поворота стрелы  $\omega = d\varphi/dt$  ( $\varphi$  – угол подъема стрелы в текущий момент времени, град) и собственно давление в гидроцилиндрах  $P$ . Угол  $\beta$  определяется из соотношения:

$$\beta = 90^\circ - \frac{\varphi}{2} - \arcsin \left[ \frac{S_n}{\sqrt{4b_1^2 \sin^2 \left( \frac{\varphi}{2} \right) + S_n^2 - 4b_1 S_n \cos \left( \beta_n + 90^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)}} \cos \left( \beta_n - \frac{\varphi}{2} \right) \right], \quad (4)$$

в котором

$$\beta_n = \arccos \left( \frac{4b_1^2 \sin^2 \left( \frac{\varphi_k}{2} \right) + S_n^2 + S_k^2}{2b_1 S_n \sin \left( \frac{\varphi_k}{2} \right)} - 90^\circ + \frac{\varphi}{2} \right);$$

$S_n$  и  $S_k$  – задаваемые в исходных данных стандартные начальная и конечная длины штока гидроцилиндра, м;

$\varphi_k$  – конечный угол поворота стрелы, град.

Последнее слагаемое в уравнении (3) из-за сравнительно небольшой величины  $K_p$  на начальном этапе моделирования было приравнено к нулю. Затем для обоснования этой операции была рассчитана динамика коэффициента податливости при повороте стрелы лесного манипулятора (рисунок 2а).

В одни те же моменты времени в сравнении с величиной второго слагаемого в уравнении (3), которое содержит давление  $P$ , вклад слагаемого с коэффициентом податливости  $K_p$  может быть существенно ниже, поскольку  $K_p$  примерно на двенадцать порядков меньше, чем  $P$  (см. рис. 1б).

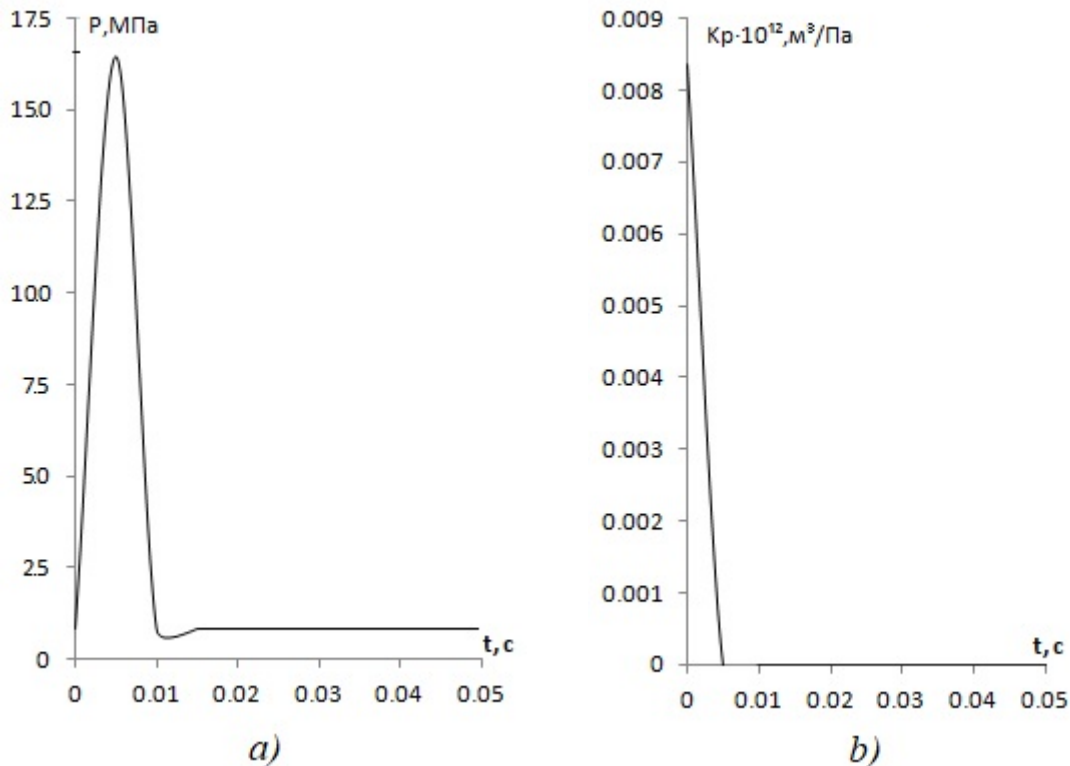


Рисунок 2. Динамика давления рабочей жидкости (а) и коэффициента податливости (b) в гидроприводе  
 Figure 2. Dynamics of the working fluid pressure (a) and the coefficient of compliance (b) in the hydraulic drive

Источник: собственная композиция авторов  
 Source: author's composition

В вычислительном эксперименте по определению оптимальной компоновки гидроцилиндра механизма подъема стрелы манипулятора ЛВ-184А по критерию минимизации скачков давления рабочей жидкости без учета податливости гидропривода были получены оптимальные точки присоединения гидроцилиндра к стреле  $b_1 = 0.9$  м и к поворотной колонне  $OB = 0.7$  м (см. рисунок 1), а при учете коэффициента податливости были приняты новые оптимальные точки присоединения гидроцилиндра:  $b_1 = 1$  м,  $OB = 0.85$  м. Для уточнения математической модели и выявления такого влияния необходимо проведение стендовых испытаний.

#### Заклучение

Таким образом, вычислительный эксперимент по оценке влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов

лесного манипулятора при совершенствовании компоновки гидроцилиндров показал, что оптимальные точки присоединения гидроцилиндра к стреле и к поворотной колонне зависят от коэффициента податливости. При этом происходит увеличение времени переходного процесса на 32% и снижение пикового давления на 41%. Но небольшое увеличение времени переходного процесса незначительно повлияет на снижение производительности гидроманипулятора, тогда как снижение пикового давления почти в 1.7 раз значительно увеличивает запас прочности металлоконструкции манипулятора. Для интерпретации модели и уточнения влияния податливости гидропривода на динамическую нагруженность механизмов лесного манипулятора необходимо проведение стендовых испытаний.

## Список литературы

1. Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском / В.И. Посметьев, В.О. Никонов, А.Ю. Мануковский, В.В. Посметьев // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2022. – № 5. – С. 85-99. – doi: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49610591>.
2. Влияние режимов движения лесовозного автопоезда при вывозке лесоматериалов на эффективность рекуперации энергии в пневмогидравлическом седельно-сцепном устройстве / В.И. Посметьев, В.А. Зеликов, В.О. Никонов, В.В. Посметьев, А.С. Чуйков, А.В. Авдюхин // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 4(48). – С. 114-129. – doi: <https://doi.org/10.34220/issn.2222.962/2022.4/8>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50018837>.
3. Ворожцов, О.В. Гидропривод рекуперации энергии транспортного средства / О.В. Ворожцов // Математическое моделирование систем и процессов: материалы Международной научно-практической конференции. Псковский государственный университет, Псков, 10-11 ноября 2022 г. / редакторы: Ю.В. Бруттан, Т.К. Антал, В.В. Фролов, В.Н. Мельник; ПсковГУ. – Псков, 2022. – С. 57-62. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50241741&pf=1>.
4. Piskunov, M. Investigation of Structure of Technology Cycle Time of Hydraulic Manipulators in the Process of Loading Forwarders with Logs / M. Piskunov // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. – 2021. – Vol. 42, No. 3. – P. 391-403. – doi: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.863>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47079669>.
5. Effects of semi-trailer modifications on HGV fuel consumption / A. K. Madhusudhanan, D. Ainalis, X. Na, I. V. Garcia, M. Sutcliffe, D. Cebon // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2021. – Vol. 92. – Art. No. 102717. – DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102717>.
6. Исследование эффективности перераспределения мощности силового привода нефтедобывающего комплекса на малодобитных скважинах при внедрении конструкции электрогидроцилиндра рекуперативного действия / В.В. Савинкин, А.В. Санду, Т.Ю. Ратушная, П. Визуриане, С.В. Колисниченко, М.Ш. Омаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332, № 2. – С. 229–244. – DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3058>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44911298>.
7. Смирнов, А.Н. Рекомендации по повышению энергоэффективности одноковшовых фронтальных погрузчиков при эксплуатации / А.Н. Смирнов, П.В. Авраменко // Минск: БГАТУ, 2020. – 76 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/mfkkct>.
8. Смирнов, А.Н. Научно-технические основы проектирования фронтальных погрузчиков: монография / А.Н. Смирнов, П.В. Авраменко. – Минск: БГАТУ, 2021. – 172 с. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/motusd>.
9. Трехскоростной гидромеханический привод возвратно-поступательного движения с рекуперацией энергии / С.А. Вялов, А.Т. Рыбак, И.К. Цыбрий, А.Ю. Пелипенко / Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2021. – № 9. – С. 397-401. – DOI: 10.36652/0202-3350-2021-22-9-397-401. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46538270>.
10. Stand for Life Tests of Plunger Hydraulic Cylinders. Modeling and Calculation / A. Pelipenko, A. Rybak, D. Sarkisian, S. Saakian, A. Zhyravlyova // XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 1 : Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Rostov-on-Don, 24-26 февраля 2021 года. – Rostov-on-Don: Springer Verlag, 2022. – P. 198-206. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_22).
11. Стенд для испытаний грузоподъемных механизмов лесных манипуляторов с рекуперацией энергии / П.И. Попиков, А.В. Конюхов, С.К. Попиков, А.В. Попикова // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 06-07 июня 2022 года. Часть II. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – С. 105-110. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49868071&pf=1>.

12. Анализ работы гидравлического манипулятора лесной машины с цикловой системой управления / Е.Н. Власов, А.В. Сергеевичев, Ю.А. Добрынин, В.В. Сергеевичев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – № 238. – С. 99-112. – DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.99-112. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48186417>.
13. Uskov, V.I. Initial-Boundary Value Problem for Perturbed Third Order Partial Differential Equations / V.I. Uskov // Journal of Mathematical Sciences. – 2021. – Vol. 255, No. 6255. – P. 779–789. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05415-1>
14. Головина, Е.В. Математическое моделирование процессов в гидроприводе сучкорезных лесных машин / Е. В. Головина // Теория и практика современной науки : сборник статей IX Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 августа 2022 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. – С. 17-21. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49327170>
15. К методике проектирования манипулятора, обеспечивающего безопасное функционирование машины в чрезвычайных ситуациях / У.П. Юнкина, М.Ю. Яковенко, Д.В. Кушляев, О.В. Кушляева, В.Ф. Кушляев // Надежность и долговечность машин и механизмов : сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 14 апреля 2022 года. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2022. – С. 452-469. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48538675&pff=1>
16. Морозов, Л.А. 3D-моделирование гидравлических параметров шестеренчатого насоса с внешним зацеплением / Л.А. Морозов, О.В. Блинов, В.А. Годлевский // Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции, Иваново, 14 апреля 2022 года. – Иваново: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2022. – С. 395-399. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=oulqdh>
17. Кирсанов, М.Н. Формула для основной частоты собственных колебаний внешне статически неопределимой фермы / М.Н. Кирсанов, С. Цзясюань // Строительная механика и конструкции. – 2023. – № 2(37). – С. 27-34. – DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.37.2.003>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53960729>.
18. Визуализация взаимосвязи между динамикой системы и ее базовыми характеристиками / Г.В. Крейнин, С.Ю. Мисюрин, А.П. Нелюбин, Н.Ю. Носова // Научная визуализация, 2020. – Т. 12, № 2. – С. 9-20. – DOI: <https://doi.org/10.26583/sv.12.2.02>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42901144>
19. Билалов, Р.Р. Многоковшовый траншейный экскаватор как объект управления / Р.Р. Билалов, И.В. Дуданов // Механизация и автоматизация строительства : сборник статей / Самарский государственный технический университет. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2022. – С. 130-133. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53944534&pff=1>
20. Патент № 2789167 С1 Российская Федерация, МПК В66С 13/42. Гидропривод грузоподъемного механизма лесного манипулятора / Попиков Петр Иванович, Черных Александр Сергеевич, Богданов Дмитрий Сергеевич, Попиков Сергей Константинович, Поздняков Евгений Владиславович, Попикова Алина Викторовна ; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова" : № 2022119768 : заявл. 19.07.2022 ; опубл. 30.01.2023, Бюл. № 12. – 2023. – режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_50267016\\_38701455.PDF](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50267016_38701455.PDF).

21. Yudina, N.Yu. Simulation of loading dynamics and hydrodynamics of drives of forest machine working bodies / N.Yu. Yudina, R.V. Yudin, A.I. Maksimenkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing Ltd, 2021. – Vol. 875, Iss. 1. – Art. No. 12060. – doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012060>.

### References

1. Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V. (2022) Computer Simulation of the Operation of the Recuperative Swivel Bunk Device of a Hauling Tractor with a Timber Drug. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], No. 5, pp. 85–99 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49610591>.
2. Posmetev V.I., Zelikov V.A., Nikonov V.O., Posmetev V.V., Chuikov A.S., Avdyuhin A.V. (2022) Influence of the modes of motion of a logging road train during the hauling of timber on the efficiency of energy recovery in a pneumohydraulic fifth wheel coupling device. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 12, No. 4 (48), pp. 114-129 (in Russian). doi: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/8>. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50018837>.
3. Vorozhtsov O.V. (2022) Hydraulic drive for vehicle energy recovery. *Mathematical Modeling of Systems and Processes: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (Pskov State University, Pskov, November 10-11, 2022), editors: Yu.V. Bruttan, T.K. Antal, V.V. Frolov, V.N. Miller; PskovGU. Pskov, pp. 57-62 (in Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50241741&pf=1>
4. Piskunov M. (2021) Investigation of Structure of Technology Cycle Time of Hydraulic Manipulators in the Process of Loading Forwarders with Logs. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, Vol. 42, No. 3, pp. 391-403. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47079669>
5. Madhusudhanan A. K., Ainalis D., Na X., Garcia I. V., Sutcliffe M., Cebon D. (2021) Effects of semi-trailer modifications on HGV fuel consumption. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 92, 102717. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2021.102717>
6. Savinkin V.V., Sandu A.V., Ratushnaya T.Yu., Vizuriane P., Kolisnichenko S.V., Omarov M.Sh. (2021) Study of redistribution of the oil complex power drive effectiveness for marginal wells when installing construction of recuperative action electro hydro cylinder. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineerin*, Vol. 332, No. 2, pp. 229–244 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3058>
7. Smirnov A.N., Avramenko P.V. (2020) Recommendations for improving the energy efficiency of single-bucket frontal loaders during operation. Minsk: BSATU. 76 p. (in Russian). URL: <file:///C:/Users/User/Downloads/rekomendacii-po-povysheniyu-ehnergoehffektivnosti-pogruzchikov.pdf>
8. Smirnov A.N., Avramenko P.V. (2021) Scientific and technical foundations for the front loaders design: monograph. Minsk: BSATU. 172 p. (in Russian). URL: <https://rep.bsatu.by/bitstream/doc/14518/1/nauchno-tekhnicheskie-osnovy-proektirovaniya-frontalnyh-pogruzchikov.pdf>
9. Vyalov S.A., Rybak A.T., Tsybriy I.K., Pelipenko A.Yu. (2021) Three-speed hydromechanical reciprocating drive with energy recovery. *Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, No. 9, pp. 397-401 (in Russian). DOI: 10.36652/0202-3350-2021-22-9-397-401. – <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46538270>
10. Pelipenko A., Rybak A., Sarkisian D., Saakian S., Zhyravlyova A. (2022) Stand for Life Tests of Plunger Hydraulic Cylinders. Modeling and Calculation. *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021". Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 1 : Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry* (Rostov-on-Don, February 24-26, 2021). Rostov-on-Don: Springer Verlag, pp. 198-206. DOI: [10.1007/978-3-030-81619-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_22).
11. Popikov P.I., Konyukhov A.V., Popikov S.K., Popikova A.V. Stand for testing lifting mechanisms of forest manipulators with energy recovery. *Energy efficiency and energy saving in modern production and society: materials of the international scientific and practical conference* (Voronezh, June 06-07, 2022. Part II). Voronezh: Voronezh State



Agrarian University named after Emperor Peter the Great, pp. 105-110 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49868071&pff=1>

12. Vlasov E.N., Sergeevichev A.V., Dobrynin Yu.A., Sergeevichev V.V. (2022) The analysis of the work of a hydraulic manipulator of a forest machine with a cyclic control system. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, Iss. 238, pp. 99–112 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.99-112. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48186417>.

13. Uskov V.I. (2021) Initial-Boundary Value Problem for Perturbed Third Order Partial Differential Equations. *Journal of Mathematical Sciences*, Vol. 255, No. 6255, pp. 779–789. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05415-1>

14. Golovina E.V. (2022) Mathematical modeling of processes in the hydraulic drive of delimiting machines. *Theory and practice of modern science: collection of articles of the IX International Scientific and Practical Conference* (Penza, August 23, 2022). Penza: Science and Education (IP Gulyaev G.Yu.), pp. 17-21 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49327170>

15. Yunkina U.P., Yakovenko M.Yu., Kushlyaev D.V., Kushlyaeva O.V., Kushlyaev V.F. (2022) To the method of designing a manipulator that ensures the safe operation of the machine in emergency situations. *Reliability and durability of machines and mechanisms: collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference* (Ivanovo, April 14, 2022). Ivanovo: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief", pp. 452-469 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48538675&pff=1>

16. Morozov L.A., Blinov O.V., Godlevsky V.A. (2022) 3D modeling of hydraulic parameters of an external gear pump. *Reliability and durability of machines and mechanisms: collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference* (Ivanovo, April 14, 2022). Ivanovo: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Disaster Relief", pp. 395-399 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=oulqdh>

17. Kirsanov M.N., Jiaxuan S. (2023) Formula for the fundamental natural frequency of an externally statically indeterminate truss. *Structural mechanics and structures*, No. 2(37), pp. 27-34 (in Russian). DOI: <https://doi:10.36622/VSTU.2023.37.2.003>. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53960729>

18. Kreinin G.V., Misyurin S.Yu., Nelyubin A.P., Nosova N.Yu. (2020) Visualizing the relationship between system dynamics and its underlying characteristics. *Scientific visualization*, Vol. 12, No. 2, pp. 9-20 (in Russian). DOI: <https://doi:10.26583/sv.12.2.02>. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42901144>

19. Bilalov R.R., Dudanov I.V. (2022) Bucket trench excavator as a control object. *Mechanization and automation of construction: collection of articles (Samara State Technical University)*. Samara: Samara State Technical University, pp. 130-133 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53944534&pff=1>

20. Popikov Petr Ivanovich, Chernykh Alexander Sergeevich, Bogdanov Dmitry Sergeevich, Popikov Sergey Konstantinovich, Pozdnyakov Evgeny Vladislavovich, Popikova Alina Viktorovna (2023) Hydraulic drive of the load-lifting mechanism of the forest manipulator. Patent No. 2789167 C1 Russian Federation, IPC B66C 13/42. Patentee: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov": No. 2022119768: Appl. 07/19/2022; publ. 01/30/2023, Bull. No. 12. (in Russian) URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_50267016\\_38701455.PDF](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50267016_38701455.PDF)

21. Yudina N.Yu, Yudin R.V., and Maksimenkov A.I. (2021) Simulation of loading dynamics and hydrodynamics of drives of forest machine working bodies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 875, Iss. 1. Art. No. 12060. doi: 10.1088/1755-1315/875/1/012060.

## Сведения об авторах

✉ *Евсиков Иван Дмитриевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>, e-mail: [evsfan1997@gmail.com](mailto:evsfan1997@gmail.com).

*Богданов Дмитрий Сергеевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4179-8189>, e-mail: [bogdanov\\_s69@mail.ru](mailto:bogdanov_s69@mail.ru).

*Попикова Алина Викторовна* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail: [poalinka@mail.ru](mailto:poalinka@mail.ru).

*Конюхов Андрей Валерьевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1828-3673>, e-mail: [akoniukhov@gmail.com](mailto:akoniukhov@gmail.com).

## Information about the authors

✉ *Ivan D. Evsikov* – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>, e-mail: [evsfan1997@gmail.com](mailto:evsfan1997@gmail.com).

*Dmitry S. Bogdanov* – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4179-8189>, e-mail: [bogdanov\\_s69@mail.ru](mailto:bogdanov_s69@mail.ru).

*Alina V. Popikova* – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail: [poalinka@mail.ru](mailto:poalinka@mail.ru).

*Andrey V. Konyukhov* – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1828-3673>, e-mail: [akoniukhov@gmail.com](mailto:akoniukhov@gmail.com).

✉ – Для контактов/Corresponding author

Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/11>

УДК 630.232.32



## Оценка целесообразности применения мотоблоков и мини-тракторов для механизации работ в лесных питомниках Российской Федерации

Максим А. Никулин<sup>1</sup>✉, [nikuln.vrn@bk.ru](mailto:nikuln.vrn@bk.ru), <https://orcid.org/0009-0002-1105-869X>

Валерий А. Иванников<sup>1</sup>, [ivannikov\\_vrn@mail.ru](mailto:ivannikov_vrn@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-6652-3934>

Сергей С. Самойленков<sup>1</sup>, [samojlenkov91@mail.ru](mailto:samojlenkov91@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-7218-3198>

Михаил К. Асмоловский<sup>2</sup>, [asmolovsky@belstu.by](mailto:asmolovsky@belstu.by) <https://orcid.org/0009-0009-7723-8862>

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

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

На текущий момент значительная часть эксплуатируемой в постоянных лесных питомниках техники изношена на 70–80 %. При этом имеющаяся техника обладает избыточной производительностью, что в условиях малых лесных питомников приводит к избыточным эксплуатационным затратам. Площадь посевных отделений и полей под паром в современных питомниках редко превышает 3 га, что позволяет принять в качестве ближайшей аналогии по объему агротехнических работ небольшие фермерские хозяйства. На основании кластерного анализа номенклатуры существующих машин и орудий различных типов оценивали варианты переоснащения лесных питомников малогабаритными мобильными энергетическими средствами (ММЭС) и средствами малой механизации (СММ) в современных геополитических условиях. Во-первых, проанализирована информация о доступных к покупке плугов лемешных, борон дисковых, разбрасывателей твердых удобрений, опрыскивателей, сеялок точного высева и культиваторов для агрегатирования с мотоблоками и мини-тракторами. Во-вторых, определен необходимый уровень энерговооруженности тягового средства для выполнения всего перечня механизированных работ по выращиванию посадочного материала в лесном питомнике. В-третьих, оценена экономическая целесообразность применения мотоблоков и мини-тракторов для выполнения работ в лесных питомниках методом расчета «часовых эксплуатационных затрат». Сокращение ассортимента предлагаемых на рынке Российской Федерации моделей ММЭС и СММ не является ограничивающим фактором. Машин и орудий российского, белорусского и китайского производства достаточно для обеспечения механизированных работ в лесном питомнике. Наиболее эффективными являются ММЭС с мощностью двигателя 30 кВт и грузоподъемностью задней навески 700 кг. ММЭС экономически целесообразно применять при годовом объеме работ, эквивалентном 60 га условной пашни, и менее. При больших объемах экономически обосновано применение более производительных орудий с трактором тягового класса 1,4.

**Ключевые слова:** лесной питомник, механизация работ, мини-трактор, малая механизация, орудия для мини-тракторов, эксплуатационные затраты

**Финансирование:** исследование проведено при поддержке локального гранта ФГБОУ ВО ВГЛТУ.

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


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

**Для цитирования:** Оценка целесообразности применения мотоблоков и мини-тракторов для механизации работ в лесных питомниках / М. А. Никулин, В. А. Иванников, С. С. Самойленков, М. К. Асмоловский // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 143–163. – Библиогр.: с. 157–163 (40 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/11>.

Поступила 13.10.2023. Пересмотрена 18.11.2023. Принята 18.11.2023. Опубликована онлайн 30.11.2023.


Review

## Assessing the feasibility of using tillers and mini-tractors for mechanizing work in forest nurseries

Maxim A. Nikulin<sup>1</sup>✉, nikulin.vrn@bk.ru,  <https://orcid.org/0009-0002-1105-869X>

Valery A. Ivannikov<sup>1</sup>, ivannikov\_vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6652-3934>

Sergei S. Samoylenkov<sup>1</sup>, samojlenkov91@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7218-3198>

Mikhail K. Asmolovskiy<sup>2</sup>, asmolovsky@belstu.by  <https://orcid.org/0009-0009-7723-8862>

<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>Belarussian State Technological University, 13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus

### Abstract

At the moment, a significant part of the equipment operated in permanent forest nurseries is worn out by 70-80%. At the same time, the existing equipment has excessive productivity, which in conditions of small forest nurseries leads to excessive operating costs. The area of sowing departments and fallow fields in modern nurseries rarely exceeds 3 hectares, which makes it possible to accept small farms as the closest analogy in terms of the volume of agrotechnical work. Based on the cluster analysis of the nomenclature of existing machines and tools of various types, the options for re-equipping forest nurseries with small-sized mobile energy means (SMEM) and small-scale mechanization means (SMM) in modern geopolitical conditions were evaluated. Firstly, the information on ploughshares, disc harrows, spreaders of solid fertilizers, sprayers, precision seeders and cultivators for aggregation with tillers and mini-tractors available for purchase was analyzed. Secondly, the necessary level of power-to-weight ratio of the heavy vehicle has been determined to perform the entire list of mechanized work on growing planting material in a forest nursery. Thirdly, the economic feasibility of using tillers and mini-tractors to perform work in forest nurseries by calculating "hourly operating costs" was evaluated. The reduction of the range of SMEM and SMM models offered on the market of the Russian Federation is not a limiting factor. There are enough machines and tools of Russian, Belarusian and Chinese production to ensure mechanized work in a forest nursery. The most effective are SMEM with an engine power of 30 kW and a load capacity of 700 kg rear suspension. SMEM is economically feasible to use with an annual volume of work equivalent to 60 hectares of conventional arable land, or less. With large volumes, the use of more productive tools with a tractor of traction class 1.4 is economically justified.

**Keywords:** forest nursery, mechanization of work, mini-tractor, small-scale mechanization, attachments for mini-tractors, operational costs

**Funding:** the research supported by a local grant from the FSBEI HE VSUFT.

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

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

**For citation:** Nikulin M. A., Ivannikov V. A., Samoylenkov S. S., Asmolovskiy M. K. (2023). Assessing the feasibility of using tillers and mini-tractors for mechanizing work in forest nurseries. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 143-163 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/11>.

*Received* 13.10.2023. *Revised* 17.11.2023. *Accepted* 18.11.2023. *Published online* 30.11.2023.

### Введение

Согласно федеральному проекту «Сохранение лесов» к 2024 году в Российской Федерации количество вырубаемого леса должно быть в полной мере компенсировано за счет лесовосстановления, причем основной объем работ должен возлагаться на арендаторов лесных земель. К 2024 году объем лесовосстановления в России должен достигнуть уровня в полтора миллиона гектар ежегодно (*Сохранение лесов — Национальный проект Экология*).

Доля искусственного лесовосстановления сегодня составляет около 22 %. Для обеспечения реализации федерального проекта необходимо к 2024 году 879 млн. штук посадочного материала, включая расход на компенсационное лесовосстановление (*План деятельности Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации на 2019 - 2024 годы*" (утв. Минприроды России 11.03.2022 N 9/12); *Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 N 312-р <Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года>*). При этом в ряде регионов на протяжении последних лет наблюдается дефицит посадочного материала («*Центр защиты Леса Пермского края*» - *Отчет о результатах работ по государственному мониторингу воспроизводства лесов в Пермском крае за 2017 год*) [16, 14, 2]. Однако, стартовавшая в 2019 году программа переоснащения лесных хозяйств, в первую очередь коснулась борьбы с лесными пожарами (*Официальный портал Республики Тыва; Официальный портал администрации Краснозороенского района; Forest.ru*).

На это есть как минимум две причины: во-первых, предотвращение лесного пожара значительно выгоднее устранения его последствий; во-вторых, в лесном законодательстве Российской Федерации в отношении лесных питомников существует ряд сдерживающих факторов.

Например, в соответствии со статьей 39.1 Лесного кодекса Российской Федерации деятельность лесных питомников считается предпринимательской (*ЛК РФ Статья 39.1. Создание лесных питомников и их эксплуатация*), и это приводит к тому, что лесные питомники за счет средств бюджетов Российской Федерации в большинстве слу-

чаев финансируются по остаточному принципу [24].

Следствием вынужденной финансовой самостоятельности лесных питомников стало то, что парк машин и оборудования, находящихся в постоянном бессрочном пользовании специализированных учреждений субъектов Российской Федерации, не обновлялся с 2006 года и фактически изношен на 70 - 80 процентов (*Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 N 312-р <Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года>*). В связи с этим возникает проблема рационального обновления парка машин лесных питомников с учетом экономической и технологической целесообразности и необходимости создания потенциала к оптимизации и автоматизации технологических процессов.

Площадь посевных отделений и полей под паром в современных лесных питомниках редко превышает 3 га (*сайт департамента Смоленской области по охране, контролю и регулированию использования лесного хозяйства, объектов животного мира и среды их обитания*) [2, 5, 20, 21]. Это позволяет предположить, что ближайшей аналогией для рассмотрения работ в лесных питомниках являются небольшие фермерские хозяйства.

Существует несколько вариантов перевооружения лесных питомников: покупка техники, аналогичной той, что уже эксплуатируется (универсально-пропашные тракторы класса 1,4 и соответствующие орудия); аренда техники для выполнения наиболее энергоемких работ, значительное увеличение доли ручного труда; подбор менее энергоемких, и как следствие менее производительных машин и орудий, которые будут дешевле, чем универсальные сельскохозяйственные машины.

Вариант с обновлением парка без серьезного изменения номенклатуры является неоптимальным для небольших питомников, т.к. высокая начальная стоимость сельскохозяйственных машин и затраты на их эксплуатацию при малом ежегодном объеме работ приведут к увеличению себестоимости посадочного материала вследствие ограниченного срока эксплуатации машин и оборудования [4, 15].

Аренду техники для почвообработки и увеличение доли ручного труда также можно исклю-

чить: при небольшом объеме работ доставка техники в питомник будет вносить существенный вклад в общую стоимость работ, что также приведет к росту себестоимости посадочного материала [7, 8, 9, 36, 40]. Тем не менее, существуют исследования, показывающие превосходство ручного труда над механизированным в лесных питомниках площадью менее 1-1,5 га [39].

Третий вариант с подбором оптимального машинно-тракторного парка требует более детального анализа. Тема применения мотоблоков и мини-тракторов в условиях небольших по площади фермерских хозяйств общей площадью полей до 3-5 га активно прорабатывается в мире [26, 27, 31, 32, 37], изучаются вопросы безопасности и эргономичности ММЭС [34, 38]. Их применяют для широкого круга сельскохозяйственных задач, включая вспашку, опрыскивание, посев и пересадку [28, 35], прополку и межкультурные мероприятия, орошение, распыление пестицидов и опыление, сбор урожая и послеуборочные операции, транспортировку [30]. В ряде развивающихся стран сейчас наблюдается повышение интереса к мотоблокам и мини-тракторам со стороны политического руководства, проводятся стимулирующие мероприятия [29]. В первую очередь, такой интерес к теме малой механизации обоснован низкой начальной стоимостью машин и орудий и меньшими эксплуатационными затратами относительно крупной сельскохозяйственной техники при работе на малых площадях.

На основании вышеизложенного можно предположить, что годовую себестоимость работ при выполнении работ в лесных питомниках можно снизить путем применения средств малой механизации (СММ) и малогабаритных мобильных энергетических средств (ММЭС) — мотоблоков и мини-тракторов.

Таким образом, цель данного исследования — оценка целесообразности применения существующих СММ и ММЭС для механизации работ в лесных питомниках.

Для достижения поставленной цели в рамках данной работы предполагается решить три задачи.

1. Осуществить поиск и систематизацию информации о доступных к покупке плугов лемеш-

ных, борон дисковых, разбрасывателей твердых удобрений, опрыскивателей, сеялок точного высева и культиваторов для агрегатирования с мотоблоками и мини-тракторами.

2. Определить необходимый уровень энерговооруженности мотоблока или мини-трактора для выполнения всего перечня механизированных работ по выращиванию посадочного материала в лесных питомниках.

3. Оценить экономическую целесообразность применения мотоблоков и мини-тракторов для выполнения работ в лесных питомниках.

### Материалы и методы

*Объект и предмет исследований.* Объект исследования: технологический процесс выращивания посадочного материала в лесных питомниках.

*Предмет исследования:* номенклатура парка машин и оборудования для механизации работ по выращиванию посадочного материала с открытой корневой системой в лесных питомниках малой площади.

*Сбор данных.* Поиск и накопление материалов произведен согласно концепции обзора предметного поля [23, 33].

Источниками послужили научные электронные библиотеки «ELibrary.ru» и «КиберЛенинка»; многофункциональная поисковая платформа научных публикаций "Google Академия"; единая библиографическая и реферативная база данных рецензируемой научной литературы «Scopus»; каталоги фирм, реализующих сельскохозяйственные орудия на территории Российской Федерации, представленные в сети «Интернет». Поисковые запросы формировались на основании ключевых слов: «мини-трактор», «средства малой механизации», «пług для мотоблока», «пług для мини-трактора», «бороны дисковые малые», «борона для мини-трактора», «РУМ малого объема», «разбрасыватель удобрений для мини-трактора», «сеялка для мотоблока», «сеялка для мини-трактора», «опрыскиватель для мини-трактора», «культиватор для мини-трактора» и их прямые англоязычные аналоги. Для формирования сложных запросов использовались соответствующие литерные операторы для каждой поисковой системы.

Из активных каталогов фирм, реализующих сельскохозяйственные орудия на территории Российской Федерации, были отобраны доступные на текущий момент к покупке орудия для агрегатирования с мотоблоками и мини-тракторами.

Для оценки необходимой энерговооруженности в рамках данной работы рассматривается тяговое сопротивление лемешных плугов, с учетом скорости движения ЭС 3-5 км/ч, авторами использовано рекомендованное при данных условиях выражение [21]:

$$R_{пл} = K_{пл} \cdot \alpha \cdot B_{пл}, \quad (1)$$

где  $K_{пл}$  — удельное тяговое сопротивление корпусов плуга, Н/см<sup>2</sup>;  $\alpha$  — глубина вспашки, см;  $B_{пл}$  — ширина захвата плуга, см.

Существует несколько подходов к оценке экономической эффективности сельскохозяйственных машин и орудий. Традиционный для стран СНГ приведен в ГОСТ 34393-2018 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки». Однако, он слабо адаптирован к современной рыночной экономике [13] в отличие от метода «часовых эксплуатационных затрат» («ЧЭЗ») [22].

Математически метод "ЧЭЗ" выражается как

$$ZA = ZM_{трактора} + ZM_{плуга} + S_q + S_m \quad (2)$$

$$ZM_i = (\text{Ц}/(\mu_T \cdot T_0)) \cdot \sum_{i=1}^v K_i \quad (3)$$

$$S_q = \text{Ц}_T \cdot (q_n/1000 \cdot N \cdot k_{эТ}) \cdot k_c \quad (4)$$

$$S_m = S_{ср} \cdot r \quad (5)$$

где  $ZA$  — часовые эксплуатационные затраты агрегата, руб/ч;

$ZM$  — часовые эксплуатационные затраты машины (орудия), руб/ч;

$\text{Ц}$  — заводская цена машины (орудия), руб;

$\mu_T$  — коэффициент приравнивания величины часового амортизационного ресурса отечественных машин к стандарту ASAE;

$T_0$  — амортизационный ресурс машины, ч;

$T_0 = T \cdot n$ , где  $T$  — годовой объем работ, ч;  $n$  — плановый срок эксплуатации, лет

$\sum_{i=1}^v K_i$  — общий коэффициент всех видов затрат, зависящих от заводской цены машины (орудия),

для практических расчетов  $\sum_{i=1}^v K_i = K_1 + K_2 + 0.175$ ,  $K_1 = 1.0$ ,  $K_2 = \frac{P_0 \cdot \mu_p}{100}$ ,  $P_0$  — нормированная величина суммарных затрат на ремонт заданного класса техники за амортизационный период в процентах от заводской цены, %;

$S_q$  — затраты на топливо и смазочные материалы, руб;

$\text{Ц}_T$  — стоимость топлива, руб/кг;

$q_n$  — удельный расход топлива, г/ч·л.с.;

$k_{эТ}$  — коэффициент эксплуатационного расхода топлива, экспериментальный;

$k_c$  — коэффициент учета стоимости смазочных материалов, для отечественных машин 1,1, для зарубежных 1,25;

$S_m$  — расходы на оплату труда;

$S_{ср}$  — средняя ставка рабочего со всеми отчислениями, руб/чел·ч;

$r$  — число работников для обслуживания машины.

При этом, себестоимость механизированного процесса руб/га будет выражена как

$$SS_{мп} = ZW = \frac{ZA}{W_3}, \quad (6)$$

где  $W_3$  — эксплуатационная производительность агрегата, равная

$$W_3 = 0.1 \cdot B \cdot V \cdot k_3, \quad (7)$$

где  $B$  — ширина захвата агрегата, м;  $V$  — рабочая скорость агрегата, км/ч;  $k_3$  — коэффициент использования рабочего времени агрегата.

*Анализ данных.* Сравнение годовой себестоимости работ производилось исходя из того, что трудоемкость и материалоемкость механизированных работ возможно привести к гектарам пашни [6, 12].

Из систематического поиска были отобраны наиболее релевантные конструкции плугов, дисковых борон, разбрасывателей твердых удобрений, сеялок точного высева, опрыскивателей и культиваторов из предложенных на рынке РФ и проведен статистический анализ степени их сходства и различия по конструктивно-технологическим параметрам. Оценку степени сходства и различия про-

водили с использованием иерархической диаграммы сходства, оценивающей удаленность признаков от центра на основании меры квадрата Эвклидова расстояния с помощью пакета прикладных программ (StatSoft Statistica v6.0 Rus).

### Результаты

**Плуги лемешные отвальные.** Ассортимент лемешных отвальных плугов для агрегатирования с МЭС состоит из плугов с одноточечным креплением и трехточечной навеской. Для агрегатирования с мини-тракторами подходят оба типа, в то время как для мотоблоков — только первый. По компоновке предлагаются четыре вида плугов: однокорпусный (в том числе с подрезным диском), двухкорпусный и двухкорпусный оборотный (один рабочий корпус на проход). На рис. 1 представлены вышеописанные виды плугов с одноточечным креплением (плуги под трехточечную навеску аналогичны).

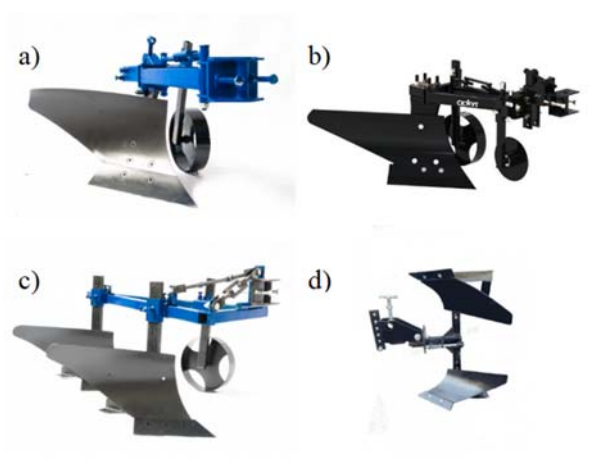


Рисунок 1. Плуги для агрегатирования с ММЭС:  
а – однокорпусный, б – однокорпусный с подрезным диском, с – двухкорпусный, d – оборотный

Figure 1. Plows for two-wheels and sub compact tractors: a – single furrow, b – single furrow with scoring disc, c – double furrow, d – single furrow reversible plow

Источник: каталог компании «Агро-амбар».

URL: <https://agro-ambar.ru/>

Source: catalogue of the company «Агро-амбар».

URL: <https://agro-ambar.ru/>

Ширина захвата корпуса плуга составляет 150-250 мм, глубина обработки подразумевается в разных моделях от 150 до 230 мм. Примечательно, что серийных моделей для мини-тракторов с предплужниками на текущий момент не представлено.

Всего на рынке представлены 44 модели от 20 брендов (рис. 2).

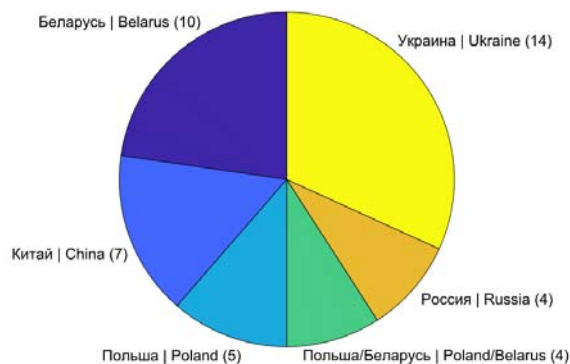


Рисунок 2. Распределение моделей плугов по странам-производителям  
Figure 2. Distribution of plow models by countries of origin

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: author's calculations



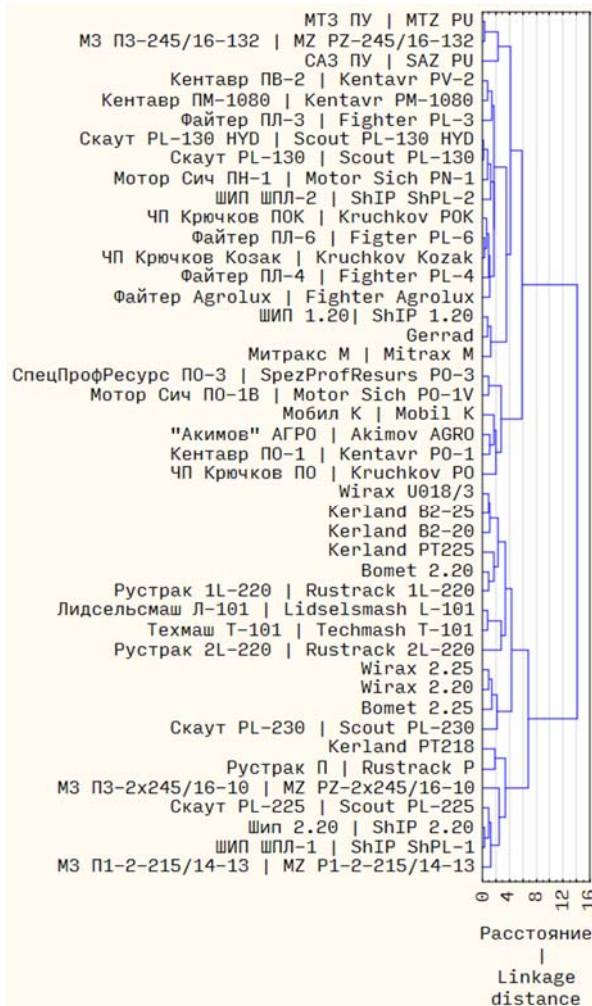


Рисунок 3. Иерархическая диаграмма сходства и различия плугов

Figure 3. Hierarchical diagram of the similarities and differences of plows

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

Рассматриваемые в рамках данной работы плуги можно разделить на 6 кластеров (рис. 3). В первом – три однокорпусных плуга белорусского производства с трехточечной навеской, имеющих заявленную глубину обработки 180 мм и ширину захвата 250 мм. Во втором – 13 плугов от разных производителей, имеющих по одному корпусу, одноточечную навеску и близкие значения ширины и глубины обработки. К третьему кластеру отнесены оборотные плуги, близкие по характеристикам к второму кластеру. В четвертом кластере – 9 двухкорпусных плугов с трехточечной навеской и заявленной глубиной обработки 210-250 мм. В пятом

кластере четыре плуга, аналогичных плугам четвертого кластера, но с глубиной обработки 300-350 мм. В шестой кластер отнесены 7 двухкорпусных плугов с глубиной обработки до 200 мм.

В агрегатировании с мототракторами допустимо использовать плуги из первых трех кластеров.

**Бороны дисковые.** Ассортимент дисковых борон для агрегатирования с мини-тракторами представлен 14 моделями с шириной захвата до 1300 мм и диаметром дисков порядка 300-450 мм. Масса таких борон составляет как правило 200-250 кг. Примечательно, что дисковых борон для агрегатирования с мотоблоками нет. Пример характерной бороны для мини-трактора представлена на рис. 4.

В значительном количестве каталогов фирм, реализующих дисковые бороны рассматриваемого класса, не указывают торговую марку производителя и страну производства. Это делает невозможным анализ распределения брендов и моделей по странам. Отметим, что основными производителями, которые чаще прочих встречаются в каталогах, являются «Русич» (Россия), «ФермерТехника» (Россия), ООО ПФ «Автотехпласт» (Россия), «Скаут» (Россия-Китай), «Kerland» (Польша-Беларусь), «Bomet» (Польша).



Рисунок 4. Дисковая борона для мини-тракторов «Скаут»

Figure 4. Disc harrow for sub compact tractors "Scout"

Источник: каталог компании «Агроград».

URL: <https://agrogradt.com/>

Source: catalog of the company «Агроград».

URL: <https://agrogradt.com/>

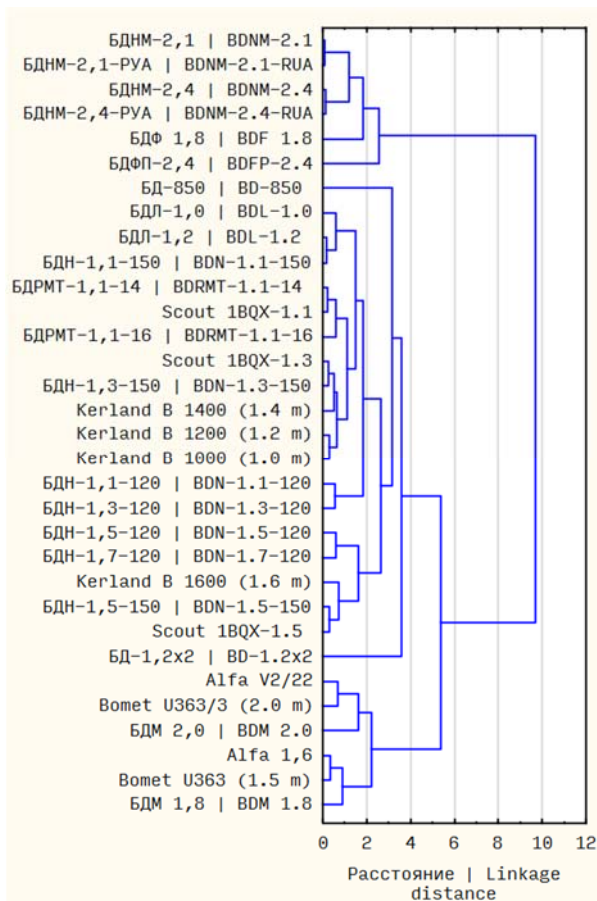


Рисунок 5. Иерархическая диаграмма сходства и различия дисковых борон  
 Figure 5. Hierarchical diagram of the similarities and differences of disc harrows

Источник: Собственные вычисления авторов  
 Source: Authors' own calculations

Рассматриваемые в рамках данной работы дисковые бороны можно разделить на 3 кластера (рис. 5). В первом кластере — бороны с шириной захвата свыше 2 м, глубиной обработки 180-200 мм, количеством корпусов 10-14, диаметром дисков преимущественно 640 мм и массой около 1 т. Во втором — бороны с шириной захвата 0,8-1,7 м, глубиной обработки 120-150 мм, количеством корпусов 6-18, диаметром дисков 300-560 мм и массой до 550 кг. В третьем кластере — бороны с шириной захвата 1,8-2,2 м, глубиной обработки 140-170 мм, количеством корпусов 14-20, диаметром дисков преимущественно 510-640 мм и массой до 550 кг.

Для агрегатирования с минитракторами допустимо использовать бороны из второго кластера (с оговоркой, что конкретный минитрактор спосо-

бен работать с конкретной бороной исходя из её массы и тягового сопротивления).

**Разбрасыватели твердых удобрений и мульчи.** В ассортименте разбрасывателей минеральных удобрений (РУМ) на текущий момент нет специальных машин для агрегатирования с минитракторами. Однако, модели с меньшим объемом бункера и малой массой могут применяться исходя из условия грузоподъемности навески минитрактора и наличия вала отбора мощности.

Сегодня на рынке преобладают два типа навесных РУМ: однодисковые и двухдисковые (рис. 6). Основное отличие в ширине захвата и объеме бункера: средним захватом для однодискового РУМ является 12-14 м, для двухдискового — 22-24 м. Объем однодисковых РУМ, как правило, составляет 400-600 л, двухдисковых — 800-1200 л. Собственная масса РУМ различных модификаций обычно лежит в диапазоне от 80 кг до 340 кг.

Распределение по странам и количеству доступных моделей установить также не удалось ввиду неполноты информации на сайтах и в каталогах производителей и ритейлеров. Основными представителями рынка РУМ в РФ сегодня являются: «ОптСельМаш» (Россия), «ВСК» (Россия), «Кубаньжелдормаш» (Россия), «АгроТех» (Россия), «D-POL» (Беларусь), «STRUMYK» (Польша), «AGROLEAD» (Турция).



Рисунок 6. Разбрасыватель минеральных удобрений (а – однодисковый; б – двухдисковый)  
 Figure 6. Mineral fertilizer spreader (a - single disc; b - double disc)

Источник: каталог компании «Агроград».  
 URL: <https://agrogradt.com/>  
 Source: catalog of the company «Агроград».  
 URL: <https://agrogradt.com/>

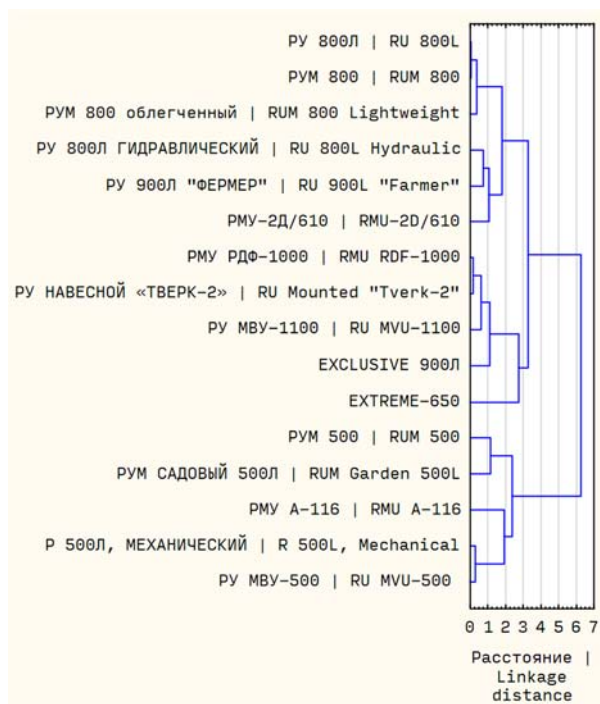


Рисунок 7. Иерархическая диаграмма сходства и различия разбрасывателей минеральных удобрений

Figure 7. Hierarchical diagram of the similarities and differences of mineral fertilizer spreaders

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

Рассматриваемые в рамках работы разбрасыватели твердых удобрений можно разделить на 3 кластера (рис. 7). В первых двух содержатся разбрасыватели двухдисковые с шириной захвата 24 м и объемом бака 610-900 л. Во втором — также двухдисковые с шириной захвата 24 м, но объемом бака 650-1100 л. В третий кластер отнесены однодисковые разбрасыватели с шириной захвата 12-24 м и объемом бака 500-600 л.

Для минитракторов можно использовать РУМ из третьего кластера с учетом предельной грузоподъемности задней навески. Для обхода ограничения грузоподъемности возможна доработка рассмотренных навесных РУМ – установка на несущую платформу, аналогично серийным большеобъемным прицепным РУМ.

**Сеялки точного высева.** Ассортимент сеялок для мини-тракторов сегодня представлен изделиями российского, украинского и совместного российско-китайского производств (рис. 8). Поль-

ские, турецкие или белорусские сеялки на рынке РФ представлены только в модификациях для агрегатирования с тракторами класса 0,9 и выше.

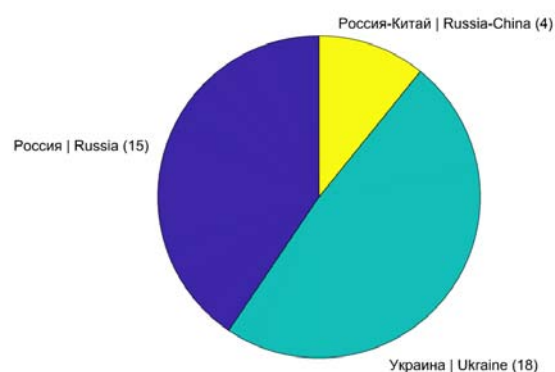


Рисунок 8. Распределение моделей сеялок для мини-тракторов по странам-производителям

Figure 8. Distribution of seeders models for subcompact tractors by countries of origin

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: author's calculations

Те сеялки, которые возможно агрегатировать с мотоблоками или мини-тракторами, как правило имеют ячеисто-щеточный механизм дозирования семян. Минимальное расстояние между строчками, ввиду конструктивных особенностей сеялок, не менее 130 мм. Большинство модификаций — не менее 150 мм. Это ведет к необходимости двухпроходного сева в ленту для обеспечения конфигураций типа 10-30-10-30-10-60.

Большинство моделей сеялок имеют модификации с бункером для удобрений и механизмом их внесения в посевные строчки. При этом разница в стоимости может составлять от 5 % до 25 %.



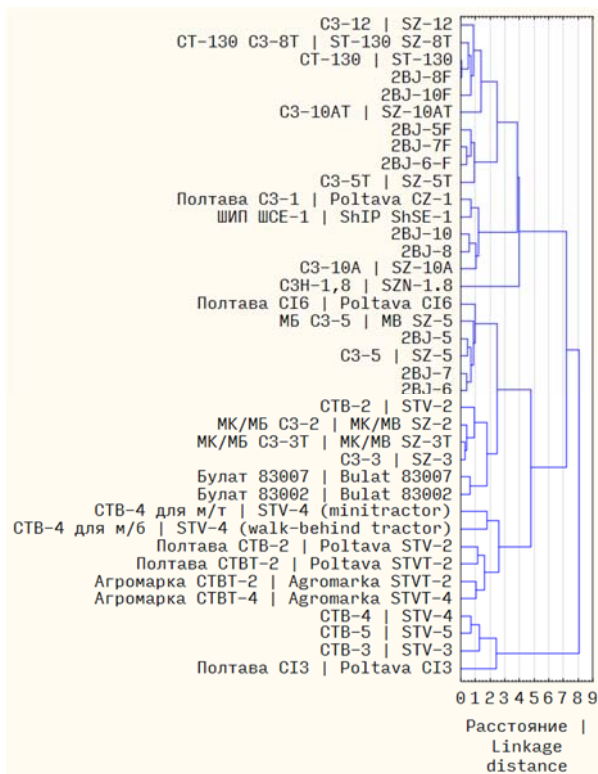


Рисунок 9. Иерархическая диаграмма сходства и различия сеялок

Figure 9. Hierarchical diagram of the similarities and differences of seeders

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

Рассматриваемые в рамках данной работы сеялки можно разделить на 6 кластеров (рис. 9).

В первый кластер отнесены сеялки с шириной захвата 950-1860 мм, количеством строчек от 3 до 5, регулируемым расстоянием между строчками (кроме СЗ-12) в диапазоне 150-300 мм, наличием бункера для удобрений и массой от 52 до 150 кг.

Во второй – сеялки с шириной захвата 1200-1860 мм, количеством строчек от 8 до 10, регулируемым расстоянием между строчками (кроме ШИП ШСЕ-1 и Полтава СЗ-1) в диапазоне 150-300 мм, без бункера для удобрений и массой от 82 до 134 кг.

В третий кластер попадает одна сеялка СЗН-1,8, имеющая ширину захвата 1800 мм, 12 строчек, регулировку расстояния между строчками в диапазоне 150-300 мм, с бункером для удобрений и наибольшей массой среди рассматриваемых сеялок — 240 кг.

В четвертый кластер отнесены сеялки с шириной захвата 300-1370 мм, количеством строчек от 2 до 7, регулируемым расстоянием между строчками в диапазоне 150-300 мм (130-400 мм для СТВ-2), без бункера для удобрений и массой от 15 до 105 кг.

В пятый кластер отнесены сеялки с шириной захвата 1100-3000 мм, количеством строчек от 2 до 4, с наиболее широкими возможностями регулировки расстояния между строчками, преимущественно в диапазоне 150-500 мм (для Полтава СТВ-2 — 160-800 мм), без бункера для удобрений (кроме Полтава СТВ-4 для минитракторов) и массой от 40 до 85 кг.

Шестой кластер составляют сеялки с шириной захвата 1700-3000 мм, количеством строчек от 3 до 5, широким диапазоном регулировки расстояния между строчками 300-700 мм (250-700 для Полтава СІЗ, с бункером для удобрений (кроме Полтава СІЗ) и массой от 92 до 145 кг.

Наиболее подходящими для лесных питомников являются сеялки, отнесённые ко второму кластеру, однако, тема лесопитомниковых сеялок на текущий момент остаётся открытой: применяемые сельскохозяйственные решения с малой шириной захвата являются своего рода компромиссом между требованиями к посеву посадочного материала в лесном питомнике и существующими решениями.

**Опрыскиватели.** Ассортимент опрыскивателей состоит практически полностью из орудий, предназначенных для тракторов с высокой грузоподъемностью задней навески: средний объем резервуара 1000 л. Отметим, что у мини-тракторов типа «Скаут Т-18» грузоподъемность навески составляет около 250 кг, а у МТЗ-320 и аналогичных — 750 кг.

Основными производителями, в продуктовых линейках которых представлены малообъемные опрыскиватели, являются WJG (Польша), DEMAROL (Польша), BIARDZKI (Польша), Promar (Польша), Vadilli (Турция), MOSH (Турция), D-POL (Беларусь), ООО ТД АгроПромГрупп (Россия), MV-Group (Россия).

Существуют предприятия, которые изготавливают опрыскиватели под заказ. Например, ИК-2

УФСИН России по Рязанской области, ФКУ (Россия, Рязанская область).

На текущий момент оптимальным решением по мнению авторов для мини-тракторов типа «Скаут» и «Уралец» можно считать опрыскиватель OGR-200, с объемом резервуара 200 л, шириной обработки 8 м и полной массой до 340 кг. Стоимость такого опрыскивателя около 70 000 р. В зависимости от модификации мини-трактора и грузоподъемности навески возможно неполное использование объема резервуара. Тем не менее, производимых на текущий момент альтернатив не обнаружено. Для тракторов уровня МТЗ-320 возможно применение любого малообъемного опрыскивателя с объемом резервуара до 600 л.



Рисунок 10. Опрыскиватель навесной 300 л, рабочая ширина 9 м

Figure 10. Mounted sprayer 300 l, working width 9 m

Источник: каталог компании «Агроград».

URL: <https://agrogradt.com/>

Source: catalog of the company «Agrograd».

URL: <https://agrogradt.com/>

**Культиваторы.** Ассортимент культиваторов для обработки междурядий достаточно широк, чтобы не считать его ограничивающим фактором для выполнения операций, предусмотренных технологическим процессом ухода за сеянцами в лесных питомниках.

Одним из наиболее подходящих для междурядной обработки активных орудий можно считать культиватор КФП-1,5 в двухрядной конфигурации (рис. 11) с фрезами на 520 мм по щиткам. Также для КФП-1,5 существуют более легкие фрезы с ши-

риной в 310 мм по щиткам. Ограничивающим фактором здесь является грузоподъемность задней навески: масса наиболее легкой конфигурации КФП-1,5 для работы на два междурядья составляет около 500 кг.



Рисунок 11. Культиватор фрезерный КФП-1,5

Figure 11. Milling cultivator KFP-1.5

Источник: каталог компании «АгроМир».

URL: <https://www.tpk-agromir.ru/>

Source: catalog of the company "AgroMir".

URL: <https://www.tpk-agromir.ru/>

Отметим, что на текущий момент для работ в питомниках часто применяется КФП-1,5 в агрегатировании с МТЗ-82 и аналогичными универсально-пропашными тракторами.

В связи с высокой массой активных орудий, для применения с наиболее легкими мини-тракторами целесообразно применение пассивных орудий: культиваторов, рыхлителей.

Анализ цен для данных орудий производить нецелесообразно ввиду широкого перечня орудий, применимых к выполнению операций рассматриваемого технологического процесса. Цены варьируются от 10 тысяч рублей за пассивные орудия с малой шириной захвата до полумиллиона рублей за активные орудия высокой производительности, которые, тем не менее, возможно агрегатировать с тракторами тягового класса 0,6-0,9.

**Оценка средней стоимости навесного оборудования.** Распределение цен на сельскохозяйственные орудия, рассмотренные выше, представлено на рис. 12.

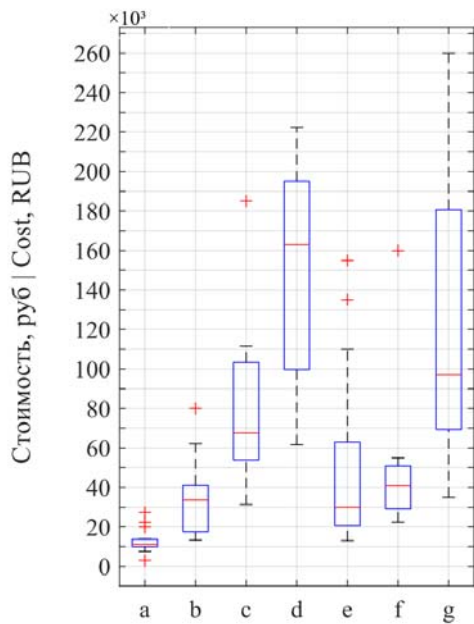


Рисунок 12. Распределение цен на сельскохозяйственные орудия, агрегируемые с мотоблоками и мини-тракторами

a — цена на однокорпусные плуги; b — цена на двухкорпусные плуги; c — цена на дисковые бороны шириной 1000–1400 мм; d — цена на дисковые бороны шириной 1500–2500 мм; e — цена на сеялки до 6 строчек; f — цена на сеялки 7–12 строчек; g — цена на разбрасыватели с объемом бака 500–1000 л.

Figure 12. Distribution of prices of agricultural implements for two-wheels and sub compact tractors  
a — price for single-hull plows; b — price for double-hull plows; c — price for disc harrows 1000–1400 mm wide; d — price for disc harrows with a width of 1500–2500 mm; e — price for seeders up to 6 lines; f — price for seeders 7–12 lines; g — price for spreaders with a tank volume of 500–1000 l.

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: author's calculations

**Оценка потребной энерговооруженности МЭС.** Тяговое сопротивление плуга является наибольшим при вспашке почвы согласно технологическому процессу среди прочих операций, поэтому логично оценивать потребную энерговооруженность МЭС для выполнения технологического процесса выращивания посадочного материала в открытом питомнике именно по этому критерию.

На рис. 13 представлена зависимость тягового сопротивления плуга  $R_{пл}$  от ширины захвата плуга  $B_{пл}$  и глубины обработки почвы  $\alpha$  при работе на средних по тяжести почвах ( $K_{пл} = 0.6 \text{ кг/см}^2$ ). Для легких ( $K_{пл} = 0.3 \text{ кг/см}^2$ ), среднетяжелых ( $K_{пл} = 0.9 \text{ кг/см}^2$ ) и тяжелых ( $K_{пл} = 1.2 \text{ кг/см}^2$ ) почв значения можно получить умножив значение тягового сопротивления на 0.5, 1.5 и 2 соответственно.

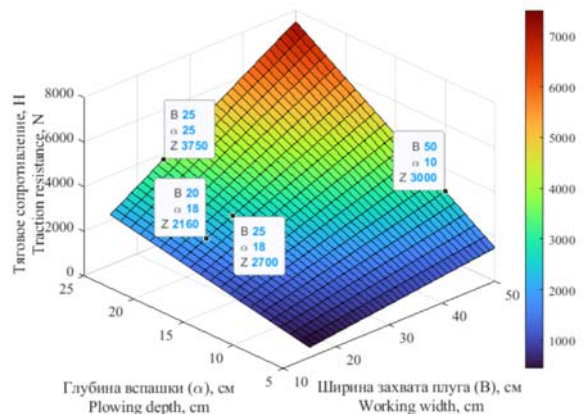


Рисунок 13. Тяговое сопротивление плуга  
Figure 13. Plow draft resistance

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: author's calculations

Из рис. 13 видно, что для однокорпусного плуга шириной 20–25 см для работы на средних почвах при скорости движения 5 км/ч и глубине обработки почвы на глубину 25 см необходим МТА тяговым классом 0.4–0.6 и выше, что соответствует тракторам с мощностью 18–23 кВт, например, Т-25, Т-30, «Беларус» серии 300.

Для ММЭС, тяговое усилие которых составляет до 4 кН (мощность 7–10 кВт) доступна обработка легких почв однокорпусным плугом шириной до 20 см на глубину до 18 см.

Внесение сидератов на подготовленных почвах на глубину 5–10 см средствами малой механизации с тягой до 4 кН возможно двухкорпусным плугом с шириной захвата до 50 см.

Вопреки заявлениям производителей, на достаточную глубину (18–22 см) обработать почву даже однокорпусным плугом шириной 20 см мотоблоки мощностью до 5 кВт не способны ввиду малой массы и низкого тягового усилия (как прави-

ло, менее 1.8 кН), пределом для них является вспашка легких почв однокорпусным плугом шириной 15–20 см на глубину до 10 см, что актуально только для внесения удобрений.

**Экономическая целесообразность применения МЭС при механизации работ в лесных питомниках.** Для оценки целесообразности применения мотоблоков и мини-тракторов в условиях

лесных питомников необходимо рассчитать «ЧЭЗ» для МТА различных классов. Исходные данные для расчета «ЧЭЗ» и сравнения стоимости годовых работ приведены в табл. 1. Результаты расчетов стоимости механизированных работ в зависимости от годового объема в условных гектарах пашни приведены на рис. 14.

Таблица 1

Исходные данные для расчета эксплуатационных затрат

Table 1

Initial data for calculating operating costs

№	Показатель   Specification	Уралец-224	МТЗ-320	МТЗ-82
1	Мощность трактора, л.с.   Tractor power, hp	22	36	90
2	Цена трактора, руб   Tractor price, rub	530000	930000	2900000
3	Орудие   Agricultural tool	ШПЛ-4	ШПЛ-2	ПЛН-3-35
3	Цена орудия, руб   Agricultural tool price, rub	12000	19900	120000
4	Срок эксплуатации машины, лет   Service life of the machine, years	20		
5	Срок эксплуатации орудия, лет   Tool service life, years	20		
6	Общий коэффициент затрат машины   Overall machine cost factor	1,975		
7	Общий коэффициент затрат орудия   Overall tool cost factor	2,175		
8	Стоимость топлива, руб/кг   Fuel cost, rub/kg	65,16		
9	Удельный расход топлива, г/ч·л.с.   Specific fuel consumption, g/h·hp	280	320	230

Источник: использована информация из каталога ритейлера «Центр технического оборудования» URL: <https://mtraktor.ru/>

Source: used information from the catalog of the retailer "Technical Equipment Center" URL: <https://mtraktor.ru/>



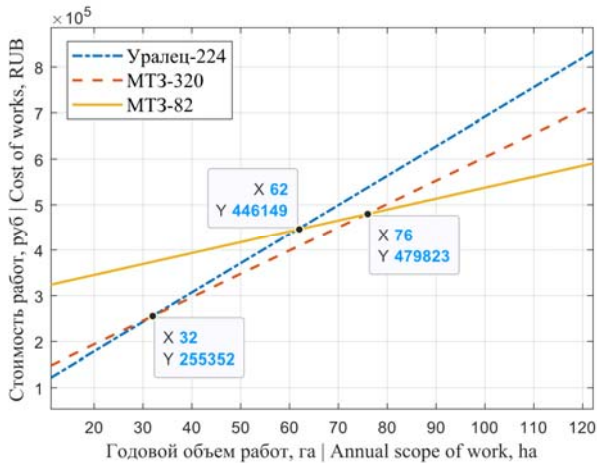


Рисунок 14. Стоимость механизированных работ для МТА различных классов  
Figure 14. The cost of mechanized work for tractors of various classes

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: author's calculations

Из приведенных расчетов видно, что применение СММ и ММЭС в технологическом процессе лесного питомника экономически целесообразно пока годовой объем работ не превысит эквивалент 60 га пашни.

### Обсуждение

Проведенный в рамках данной работы анализ номенклатуры предлагаемых на рынке Российской Федерации орудий для мотоблоков и минитракторов показал, что в современных условиях возможно формирование комплекса орудий для обеспечения технологического процесса работ в лесных питомниках. Аналогичных работ выявлено не было, однако идея формирования технологических комплексов на базе ММЭС для работ в небольших питомниках и теплицах рассматривается достаточно давно.

Оценка потребной энерговооруженности ММЭС показала, что для охвата всего технологического процесса выращивания посадочного материала в лесных питомниках необходим МТА тяговым классом 0.4–0.6, что соответствует тракторам с мощностью 18–23 кВт, например, Т-25, Т-30, «Беларус» серии 300. Аналогичная позиция освещена в публикации [3]: в качестве базовой машины для

дальнейшей модернизации авторы принимают мини-трактор «Беларус-152».

Для операций, не требующих значительной энерговооруженности тягового средства, например высев семян, учеными уже давно предлагаются различные варианты применения мотоблоков, минитракторов или, например, мотошасси на базе ЗиД-50-01 [17, 25]. Недостатком такого решения может стать необходимость содержания парка различных тяговых модулей: мотоблоков, мотошасси, минитракторов. Этот недостаток влечёт за собой усложнение технологического процесса выполнения работ из-за разных габаритных характеристик, например, ширины колеи, что наглядно продемонстрировано в работе [1].

Этого недостатка лишена предлагаемая в публикации [18] дискретная концепция системы малой механизации лесохозяйственных работ, в фундамент которой положен блочно-модульный принцип проектирования машин и орудий, т. е. использование универсального энергоблока – специализированного для данной отрасли базового шасси и шлейфа сменного рабочего оборудования.

При этом в более ранних исследованиях в Архангельском лесотехническом институте имени В.В. Куйбышева (АЛТИ) был представлен концепт САФУ (одноосный лесохозяйственный минитрактор, номинальная мощность 8 кВт), предназначенный для выполнения комплекса лесохозяйственных операций [19]. Следует отметить, что колёсный одноосный трактор такой мощности не способен обеспечить необходимое тяговое усилие для обработки почвы плугом в рамках технологического процесса выращивания посадочного материала. Упрощенные оценочные расчеты, проведенные в данной статье, не противоречат результатам, полученным в более углубленных материалах, например [10, 11]. Для ММЭС, тяговое усилие которых составляет до 4 кН (мощность 7–10 кВт) доступна обработка легких почв однокорпусным плугом шириной до 20 см на глубину до 18. Внесение сидератов на подготовленных почвах на глубину 5–10 см средствами малой механизации с тягой до 4 кН возможно двухкорпусным плугом с шириной захвата до 50 см. Применение же мотоблоков и минитракторов с фрезами в рамках стандартного тех-



нологического процесса выращивания посадочного материала в лесных питомниках изучено мало и на практике, как правило, не встречается.

### Заключение

В связи со сложившейся геополитической обстановкой рынок орудий для агрегатирования с мини-тракторами в Российской Федерации несколько сократился. Некоторые иностранные компании отказались от поставок техники в Россию и исполнения гарантийных обязательств. Тем не менее, орудий отечественного, белорусского или китайского производства достаточно для составления комплекса, способного к выполнению операций технологического процесса выращивания посадочного материала с открытой корневой системой в лесных питомниках.

С точки зрения энерговооруженности наиболее подходящими для обеспечения рассматриваемого

технологического процесса в полном объеме являются тракторы типа МТЗ-320 и аналогичные, с мощностью двигателя около 30 кВт и грузоподъемностью задней навески около 700 кг. Этого достаточно как для выполнения работ по первичной обработке почвы с приемлемой для питомников малой площади производительностью, так и для использования навесного оборудования для внесения жидких и твердых удобрений. К тому же, данные тракторы могут оснащаться фронтальными гидравлическими погрузочными механизмами.

Анализ годовых эксплуатационных затрат показал, что мини-тракторы аналогичные «Уралец-224» и «МТЗ-320» экономически целесообразно применять при годовом объеме работ, эквивалентном 60 га условной пашни или менее. При больших объемах экономически обосновано использование сельскохозяйственных орудий в агрегатировании с универсально-пропашными тракторами.

### Список литературы

1. Асмоловский, М. К. Конструктивные и технологические особенности посева семян хвойных пород в открытый грунт / М. К. Асмоловский, М. В. Ярошук // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2019. – № 2(222). – С. 104-108. – EDN RUBJZE. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39467642>.
2. Балданова, Л. П. Оценка реализации компенсационного лесовосстановления на примере Иркутской области / Л. П. Балданова // Известия Байкальского государственного университета. – 2022. – Т. 32. – № 2. – С. 407-414. – DOI 10.17150/2500-2759.2022.32(2).407-414. – EDN CSSWVA. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48747197>.
3. Голякевич, С. А. Концепция применения малогабаритного лесохозяйственного трактора с электросиловым приводом для механизации работы в теплицах лесопитомников / С. А. Голякевич, М. К. Асмоловский, Е. А. Станкевич // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2(234). – С. 168-173. – EDN JMBXEQ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43937084>.
4. Городов, А. А. Оптимизация использования машинно-тракторного парка в сельскохозяйственных организациях / А. А. Городов, Л. В. Городова, М. А. Федорова // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 9(96). – С. 3-11. – EDN SZBUBT. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22532031>.
5. Демшин, С. Л. Комплекс машин для обработки почвы и посева в условиях евро-Северо-Востока / С. Л. Демшин, М. В. Симонов // Advanced Science. – 2017. – № 2(6). – С. 20. – EDN ZJRWAV. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30146087>.
6. Жданко, Д. А. Совершенствование оценки работы машинно-тракторного парка / Д. А. Жданко, А. В. Новиков, Т. А. Непарко // Инновации в сельском хозяйстве. – 2017. – № 4(25). – С. 228-234. – EDN YVDNPH. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32756826>.
7. Камилова, Э. Р. Особенности учета аренды и лизинга новой техники в сельскохозяйственных организациях / Э. Р. Камилова, К. Д. Колесник // Новая наука: От идеи к результату. – 2016. – № 1-1. – С. 145-148. – EDN XBTOZH. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27407269>.

8. Коротких, Ю. С. Агролизинг как источник воспроизводства отечественного машинно-тракторного парка / Ю. С. Коротких // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. – 2017. – № 25(30). – С. 74-79. – EDN YOQFRB. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32426192>.
9. Кравченко, И. Н. Методика обоснования эффективности аренды сельскохозяйственной техники / И. Н. Кравченко, Ю. А. Шамарин, М. С. Мордасова // Технический сервис машин. – 2018. – Т. 133. – С. 12-19. – EDN YUGVOH. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36801571>.
10. Купряшкин, В. Ф. Анализ динамических нагрузок в приводе машины для обработки почвы в теплицах МПТ-1,2 / В. Ф. Купряшкин, Н. И. Наумкин, А. Ф. Фирстов, А. С. Уланов // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 94-100. – EDN SAJGJH. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21402725>.
11. Купряшкин, В. Ф. Анализ энергоемкости процесса вспашки почвы мотоблоком в агрегате с лемешно-отвальным плугом / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, Н. И. Наумкин [и др.] // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 414-427. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201903.414-427. – EDN GAZHVS. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41040245>.
12. Лавров, А. В. Методические подходы к оценке технологической потребности в сельскохозяйственных тракторах для АПК / А. В. Лавров, В. А. Зубина // Агроинженерия. – 2021. – № 1(101). – С. 20-26. – DOI 10.26897/2687-1149-2021-1-20-26. – EDN FNMMBJ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44779285>.
13. Матвеев, А. М. О современных методиках оценки экономической эффективности использования сельскохозяйственной техники / А. М. Матвеев, И. В. Шугуров // Вестник Курганской ГСХА. – 2014. – № 4(12). – С. 5-8. – EDN TLIDIF. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23091573>.
14. Морковина, С. С. Государственно-частное партнерство как механизм решения проблемы финансирования лесовосстановления / С. С. Морковина, Е. А. Панявина, О. И. Драпалюк // Социально-экономические явления и процессы. – 2013. – № 11(57). – С. 77-81. – EDN RQROQJ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20960369>.
15. Морковина, С. С. Факторы, определяющие функционирование объектов инфраструктуры лесного комплекса / С. С. Морковина, А. В. Константинов, О. И. Васильев // Социально-экономические явления и процессы. – 2015. – Т. 10, № 1. – С. 59-66. – EDN TNESKF. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23176957>.
16. Мочалов, Б. А. Лесокультурное производство - основа непрерывности лесопользования / Б. А. Мочалов, С. В. Бобушкина // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 4(382). – С. 80-96. – DOI 10.37482/0536-1036-2021-4-80-96. – EDN BDTAHD. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21237911>.
17. Мясичев, Д. Г. Оптимизация конструктивных параметров системы "рабочий орган - мотошасси" для измельчения напочвенного растительного покрова / Д. Г. Мясичев, С. А. Путинцев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2016. – № 215. – С. 149-162. – DOI 10.21266/2079-4304.2016.215.149-162. – EDN WAXWCF. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26180945>.
18. Мясичев, Д. Г. Потенциал малой механизации в лесохозяйственных технологических процессах / Д. Г. Мясичев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2018. – № 1(361). – С. 70-79. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2018.1.70. – EDN YNMFBS. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32367561>.
19. Мясичев, Д. Г. Синтез структуры лесохозяйственного механизированного комплекса на базе малогабаритного мобильного силового модуля / Д. Г. Мясичев // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т. 7, № 1(25). – С. 196-204. – EDN YKVTUZ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29010527>.
20. Паленова, М.М. Лесное хозяйство Турецкой Республики: обзор / М. М. Паленова, А. Н. Филипчук, А. Н. Югов, Т. А. Золина // Лесохозяйственная информация. – 2023. – № 1. – С. 68-83. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.06. – EDN KPSNMR. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50372388>.
21. Паршуков, Н. Е. Метод расчета тяговых сопротивлений плугов и других орудий при основной обработке почвы в лесном хозяйстве / Н. Е. Паршуков // Февральские чтения : Сборник материалов научно-

практической конференции профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2013 году, Сыктывкар, 18–20 февраля 2014 года. – Сыктывкар: Сыктывкарский лесной институт, 2014. – С. 367-369. – EDN VCGEAV. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25053103>.

22. Пронин, В. М. Методика оценки технико-экономических показателей сельскохозяйственной техники по критерию часовых эксплуатационных затрат / В. М. Пронин, В. А. Прокопенко // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2013. – № 3. – С. 10-14. – EDN QINCPZ – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19398808>.

23. Тихонова, Е. В. Обзор предметного поля как метод синтеза научных данных / Е. В. Тихонова, Н. М. Шленская // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2021. – № 3. – С. 11-25. – DOI 10.36107/spfp.2021.257. – EDN UUDXHJ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48003100>.

24. Шамсутдинова, А. И. Внедрение инноваций в лесное хозяйство РФ и перспективы их развития / А. И. Шамсутдинова, Г. Ф. Илалова, А. Р. Мухтарова // Наука молодых - будущее России : Сборник научных статей 2-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 5-ти томах, Курск, 13–14 декабря 2017 года / Ответственный редактор А.А. Горохов. Том 5. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2017. – С. 211-213. – EDN YBBGRQ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31736899>.

25. Якимов, В. А. Экспериментальное исследование лесного посевного агрегата на базе мототрактора / В. А. Якимов, Д. Г. Мясичев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 3-4(8-4). – С. 95-98. – DOI 10.12737/4347. – EDN SHVQVL. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21744407>.

26. Belton, B.; Win, M.T.; Zhang, X.; Filipski, M. The rapid rise of agricultural mechanization in Myanmar. *Food Policy* 2021, 101, 102095. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102095>.

27. Daum T. et al. Animal traction, two-wheel tractors, or four-wheel tractors? A best-fit approach to guide farm mechanization in Africa // *Experimental Agriculture*. – 2023. – Т. 59. – С. e12. – DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4092687>.

28. Haque M. E. и др. Versatile strip seed drill: A 2-wheel tractor-based option for smallholders to implement conservation agriculture in Asia and Africa // *Environments* - MDPI. 2016. Т. 3. № 1. С. 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.3390/environments3010001>.

29. Justice S., Biggs S. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia // *Journal of Rural Studies*. 2020. Т. 73. С. 10–20. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013>.

30. Krishnadas R., Renganathan R. A comprehensive review on power tillers usage - Bottlenecks and prospects in India. 2022. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1041/1/012018>.

31. Liao W., Zeng F., Chaniebate M. Mechanization of Small-Scale Agriculture in China: Lessons for Enhancing Smallholder Access to Agricultural Machinery // *Sustainability*. – 2022. – Т. 14. – №. 13. – С. 7964. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su14137964>.

32. Negrete J. C. Analysis of the current situation of two wheels tractors in Mexico // *Horticult. Int J*. – 2020. – Т. 4. – №. 1. – С. 28-33. – DOI: <https://doi.org/10.15406/hij.2020.04.00152>.

33. Peters M. D. J. et al. Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application // *Systematic reviews*. – 2021. – Т. 10. – №. 1. – С. 1-6. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01821-3>.

34. Rohani A. et al. Designing and modeling the power transmission mechanism for existing walking tractors to facilitate their guidance and turning // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. – 2023. – Т. 10. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01516-0>.

35. Stubbs S., Colton J. The Design of a Mechanized Onion Transplanter for Bangladesh with Functional Testing // *Agriculture (Switzerland)*. 2022. Т. 12. № 11. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111790>.

36. Takeshima H. Custom-hired tractor services and returns to scale in smallholder agriculture: a production function approach //Agricultural Economics. – 2017. – Т. 48. – №. 3. – С. 363-372. – DOI: <https://doi.org/10.1111/agec.12339>.
37. Takeshima H., Nin-Pratt A., Diao X. Mechanization and agricultural technology evolution, agricultural intensification in sub-Saharan Africa: Typology of agricultural mechanization in Nigeria //American Journal of Agricultural Economics. – 2013. – Т. 95. – №. 5. – С. 1230-1236. – DOI: <https://doi.org/10.1093/ajae/aat045>.
38. Tangtong C. et al. Risk factors associated with hand tractor related injuries among rice farmers in Thai-land //Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. – 2022. – Т. 28. – №. 1. – С. 43-57. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2021.2014301>.
39. Varol T. et al. Efficiency Comparison of Mechanization Techniques in Nursery //European Journal of Forest Engineering. – 2019. – Т. 5. – №. 2. – С. 68-76. – DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.581652>.
40. Zhang X., Yang J., Thomas R. Mechanization outsourcing clusters and division of labor in Chinese agriculture //China Economic Review. – 2017. – Т. 43. – С. 184-195. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2017.01.012>.

### References

1. Asmolovskiy M.K., Yaroshuk M.V. *Konstruktivnye i tekhnologicheskie osobennosti poseva semyan khvoynykh porod v otkrytyy grunt* [Constructive and technological features of seeding forest seeds of coniferous breeds in open ground] *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources], 2019, no. 2(222), pp. 104-108. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39467642>.
2. Baldanova, L. P. *Otsenka realizatsii kompensatsionnogo lesovosstanovleniya na primere Irkutskoy oblasti* [Evaluation of the implementation of compensatory reforestation on the example of the Irkutsk region]. *Izvestiya Baykal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Baikal State University], 2022, no.2, pp. 407-414. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48747197>.
3. Golyakevich S. A., Asmolovskiy M. K., Stankevich E. A. *Kontseptsiya primeneniya malogabaritnogo lesokhozyaystvennogo traktora s elektrosilovym privodom dlya mekhanizatsii raboty v teplitsakh lesopitomnikov* [The concept of a small size forestry tractor with electric power drive for mechanization of work in greenhouses of forestry] *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources], 2020, no. 2(234), pp. 168-173. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43937084>.
4. Gorodov, A. A., Gorodova, L.V., Fedorova, M. A. *Optimizatsiya ispol'zovaniya mashinno-traktornogo parka v sel'skokhozyaystvennykh organizatsiyakh* [The optimization of the machine-tractor park use in agricultural organizations]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasSAU], 2014, no.9(96), pp. 3-11. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22532031>.
5. Demshin, S. L., Simonov, M. V. *Kompleks mashin dlya obrabotki pochvy i poseva v usloviyakh evro-Severo-Vostoka* [A complex of machines for tillage and sowing in the conditions of the Euro-North-East]. *Advanced Science*, 2017, no.2(6), p. 20. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30146087>.
6. Zhdanko, D. A., Novikov, A. V., Neparko, T. A. *Sovershenstvovanie otsenki raboty mashinno-traktornogo parka* [Specified performance of the composition and use tractor fleet agricultural company]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve* [Innovations in agriculture], 2017, no.4(25), pp. 228-234. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32756826>.
7. Kamilova E. R., Kolesnik K. D. *Osobennosti ucheta arendy i lizinga novoy tekhniki v sel'skokhozyaystvennykh organizatsiyakh* [Features of accounting for rental and leasing of new equipment in agricultural organizations]. *Novaya nauka: Ot idei k rezul'tatu* [New science: From idea to result], 2016, no. 1-1, pp. 145-148. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27407269>.

8. Korotkikh Yu. S. *Agrolizing kak istochnik vosproizvodstva otechestvennogo mashinno-traktornogo parka* [Agroleasing as a source of reproduction of the domestic machine and tractor fleet]. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta* [Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University], 2017, no. 25(30), pp. 74-79. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32426192>.
9. Kravchenko, I. N., Shamarin, Yu. A., Mordasova, M. S. *Metodika obosnovaniya effektivnosti arendy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki* [Methodology of substantiation of efficiency of rental agricultural equipment]. *Tekhnicheskij servis mashin* [Technical Service of Machines], 2018, no.133, pp. 12-19. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36801571>.
10. Kupryashkin V. F., Naumkin N. I., Firstov A. F., Ulanov A. C. *Analiz dinamicheskikh nagruzok v privode mashiny dlya obrabotki pochvy v teplitsakh MPT-1,2* [Analysis of dynamic loads in the drive of the machine for tillage in greenhouses MPT-1,2]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technology], 2014, no. 5-1, pp. 94-100. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21402725>.
11. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I., et al. Analysis of Energy Consumption during Plowing Using a Motor-Block with Moldboard Plow. *Inzhenerynye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2019; 29(3):414-427. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41040245>.
12. Lavrov A.V., Zubina V.A. Methodological approaches to assessing the technological need for farm tractors // *Agricultural Engineering*, 2021; 1 (101): 20-26. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-1-20-26. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44779285>.
13. Matveev, A. M., Shugurov, I. V. *O sovremennykh metodikakh otsenki ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki* [About modern techniques of economic efficiency assessment when using agricultural machinery]. *Vestnik Kurganskoy GSKhA* [Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy], 2014, no.4(12), pp. 5-8. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23091573>.
14. Morkovina, S. S., Panyavina, E. A., Drapalyuk, O. I. *Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo kak mekhanizm resheniya problemy finansirovaniya lesovosstanovleniya* [State-private partnership as a mechanism of solution of the problem of financing of reforestation]. *Sotsial'no-ekonomicheskie yavleniya i protsessy* [Social and economic phenomena and processes], 2013, no.11, pp. 77-81. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20960369>.
15. Morkovina S. S., Konstantinov A. V., Vasil'ev O. I. *Faktory, opredelyayushchie funktsionirovanie ob"ektov infrastruktury lesnogo kompleksa* [Factors defining functioning of objects of infrastructure of the forest complex]. *Sotsial'no-ekonomicheskie yavleniya i protsessy* [Social and economic phenomena and processes], 2015, no.10, pp. 59-66. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23176957>.
16. Mochalov, B. A., Bobushkina, S.V. *Lesokul'turnoe proizvodstvo - osnova nepreryvnosti lesopol'zovaniya* [Forestry production is the basis for the continuity of forest management]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest magazine.], 2021, no.4, pp. 80-96. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21237911>.
17. Myasishchev D.G., Putincev S.A. Optimization of design parameters of «body work – motoshassi» for grinding of soil vegetation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2016, is. 215, pp. 149–162 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2016.215.149-162
18. D.G. Myasishchev. Potential of Small-Scale Mechanization in Forestry Technological Processes. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2018, no. 1, pp. 70–79. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.1.70
19. Myasishchev D. G. *Sintez struktury lesokhozyaystvennogo mekhanizirovannogo kompleksa na baze malogabaritnogo mobil'nogo silovogo modulya* [Synthesis of structure of forest mechanized complex based on a compact mobile power module]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry engineering journal], 2017, no.1(25), pp. 196-204. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29010527>.
20. Palenova M., Yugov A., Filipchuk A., Zolina T. Forestry in the Republic of Turkey: Overview. – Text : electronic // *Forestry information.2023. № 1. P. 68–83. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.1.06*

21. Parshukov N. E. Metod Rascheta Tyagovykh Soprotivleniy Plugov I Drugikh Orudiy Pri Osnovnoy Obrabotke Pochvy V Lesnom Khozyaystve [Method for calculating the traction resistance of plows and other implements in the main tillage in forestry], 2014, pp. 367–369. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25053103>.
22. Pronin, V. M., Prokopenko, V. A. Metodika otsenki tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki po kriteriyu chasovykh ekspluatatsionnykh zatrat [Methodology for assessing the technical and economic indicators of agricultural machinery by the criterion of hourly operating costs]. Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii [Agricultural machines and technologies], 2013, no.3, pp. 10-14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19398808>.
23. Tikhonova, E. V., Shlenskaya, N.M. Obzor predmetnogo polya kak metod sinteza nauchnykh dannykh [Scoping review as a method for synthesizing scientific data]. Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya [Storage and processing of agricultural raw materials], 2021, no.3, pp. 11-25. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48003100>.
24. Shamsutdinova A. I., Ilalova G. F., Mukhtarova A. R. Vnedreniye innovatsiy v lesnoye khozyaystvo RF i perspektivy ikh razvitiya [Introduction of innovations into forestry in the Russian Federation and prospects for their development]. Nauka molodykh - budushchee Rossii : Sbornik nauchnykh statey 2-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh. Tom 5 [Science of the young - the future of Russia: Collection of scientific articles of the 2nd International Scientific Conference on Prospective Developments of Young Scientists. Tom 5]. Kursk: Zakrytoe aktsionerное obshchestvo "Universitetskaya kniga", 2017, pp. 211-213. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31736899>.
25. Yakimov V. A., Myasishchev D. G. Eksperimental'noye issledovaniye lesnogo posevnogo agregata na baze motoshassi [Experimental study of a forest seeding unit based on a motor chassis]. Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika [Current directions of scientific research of the 21st century: theory and practice], 2014, no. 3-4(8-4), pp. 95-98. – DOI 10.12737/4347. – EDN SHVQVL. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21744407>.
26. Belton, B.; Win, M.T.; Zhang, X.; Filipski, M. The rapid rise of agricultural mechanization in Myanmar. Food Policy 2021, 101, 102095. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102095>.
27. Daum T. et al. Animal traction, two-wheel tractors, or four-wheel tractors? A best-fit approach to guide farm mechanization in Africa //Experimental Agriculture. – 2023. – T. 59. – C. e12. – DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4092687>.
28. Haque M. E. и др. Versatile strip seed drill: A 2-wheel tractor-based option for smallholders to implement conservation agriculture in Asia and Africa // Environments - MDPI. 2016. T. 3. № 1. C. 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.3390/environments3010001>.
29. Justice S., Biggs S. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia // Journal of Rural Studies. 2020. T. 73. C. 10–20. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013>.
30. Krishnadas R., Renganathan R. A comprehensive review on power tillers usage - Bottlenecks and prospects in India. , 2022. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1041/1/012018>.
31. Liao W., Zeng F., Chaniebate M. Mechanization of Small-Scale Agriculture in China: Lessons for Enhancing Smallholder Access to Agricultural Machinery //Sustainability. – 2022. – T. 14. – №. 13. – C. 7964. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su14137964>.
32. Negrete J. C. Analysis of the current situation of two wheels tractors in Mexico //Horticult Int J. – 2020. – T. 4. – №. 1. – C. 28-33. – DOI: <https://doi.org/10.15406/hij.2020.04.00152>.
33. Peters M. D. J. et al. Scoping reviews: reinforcing and advancing the methodology and application //Systematic reviews. – 2021. – T. 10. – №. 1. – C. 1-6. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01821-3>.
34. Rohani A. et al. Designing and modeling the power transmission mechanism for existing walking tractors to facilitate their guidance and turning //International Journal on Interactive Design and Manufacturing. – 2023. – T. 10. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01516-0>.

35. Stubbs S., Colton J. The Design of a Mechanized Onion Transplanter for Bangladesh with Functional Testing // Agriculture (Switzerland). 2022. Т. 12. № 11. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111790>.
36. Takeshima H. Custom-hired tractor services and returns to scale in smallholder agriculture: a production function approach // Agricultural Economics. – 2017. – Т. 48. – №. 3. – С. 363-372. – DOI: <https://doi.org/10.1111/agec.12339>.
37. Takeshima H., Nin-Pratt A., Diao X. Mechanization and agricultural technology evolution, agricultural intensification in sub-Saharan Africa: Typology of agricultural mechanization in Nigeria // American Journal of Agricultural Economics. – 2013. – Т. 95. – №. 5. – С. 1230-1236. – DOI: <https://doi.org/10.1093/ajae/aat045>.
38. Tangtong C. et al. Risk factors associated with hand tractor related injuries among rice farmers in Thailand // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. – 2022. – Т. 28. – №. 1. – С. 43-57. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2021.2014301>.
39. Varol T. et al. Efficiency Comparison of Mechanization Techniques in Nursery // European Journal of Forest Engineering. – 2019. – Т. 5. – №. 2. – С. 68-76. – DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.581652>.
40. Zhang X., Yang J., Thomas R. Mechanization outsourcing clusters and division of labor in Chinese agriculture // China Economic Review. – 2017. – Т. 43. – С. 184-195. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chieco.2017.01.012>.

### Сведения об авторах

✉ *Никулин Максим Алексеевич* – старший преподаватель кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1105-869X>, e-mail: [nikulin.vrn@bk.ru](mailto:nikulin.vrn@bk.ru).

*Иванников Валерий Александрович* – доктор техн. наук, заведующий кафедрой производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6652-3934>, e-mail: [ivannikov\\_vrn@mail.ru](mailto:ivannikov_vrn@mail.ru).

*Самойленков Сергей Сергеевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7218-3198>, e-mail: [samojlenkov91@mail.ru](mailto:samojlenkov91@mail.ru)

*Асмоловский Михаил Корнеевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, г. Минск, 13а, 220006, Республика Беларусь. E-mail: [asmolovsky@belstu.by](mailto:asmolovsky@belstu.by)

### Information about the authors

✉ *Maxim A. Nikulin* – senior lecturer of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, <http://orcid.org/0009-0002-1105-869X>, e-mail: [nikulin.vrn@bk.ru](mailto:nikulin.vrn@bk.ru).

*Valery A. Ivannikov* – Dr. Sci. (Tech.), Docent, Head of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6652-3934>, e-mail: [ivannikov\\_vrn@mail.ru](mailto:ivannikov_vrn@mail.ru).

*Sergei S. Samoylenkov* – post-graduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7218-3198>, e-mail: [samojlenkov91@mail.ru](mailto:samojlenkov91@mail.ru)

*Mikhail K. Asmolovskiy* – PhD (Engineering), Associated Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7723-8862>, e-mail: [asmolovsky@belstu.by](mailto:asmolovsky@belstu.by)

✉ – Для контактов | Corresponding author


Обзор


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>


УДК 630.232 : (004.652.4 + 303.722.4)



## Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: кластерный анализ дескрипторов

Татьяна П. Новикова ✉, [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Артур И. Новиков, [arthur.novikov@vglta.vrn.ru](mailto:arthur.novikov@vglta.vrn.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Евгений П. Петрищев, [petrishchev.vgltu@mail.ru](mailto:petrishchev.vgltu@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>

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

Отсутствие единых терминологических и технологических подходов к процедуре адаптивного лесовосстановления предполагает обоснование принципов создания справочной информационной системы (FLR-Library), учитывающей особенности реализации совместного декомпозированного FLR-алгоритма для сокращения времени его выполнения и рационального прогнозирования будущих проектов восстановления лесных ландшафтов. Собрано и проанализировано более 120 определений для более 30 дескрипторов, таких как «лес», «лесные ландшафты», «адаптивное лесовосстановление», «концепции адаптивного лесовосстановления», «лесовосстановление», «лесоразведение», «древостой», «лесное насаждение», «лесной комплекс», «лесной ландшафт», «тип леса» и других. Найдены как отличительные черты, так и общие моменты в определениях различных стран и авторов одного дескриптора. Технически реализован подход к кластеризации наиболее часто встречающихся дескрипторов: «лес», «лесные ландшафты», «лесовосстановление», «лесоразведение». Для этого по каждому дескриптору на основании модуля иерархической кластеризации определили совмещение кластера перешкалированных расстояний и построили кластерную диаграмму по переменным (критериям эффективности дескрипторов) и наблюдениям (по странам, содержащим источник информации с дескриптором). Общим для всех источников будет то, что адаптивное лесовосстановление подразумевает адаптацию к изменению климата, но далее существует два варианта развития: 1) посадка (посев) пород, устойчивых к изменению климата; 2) завоз и адаптация «южных» пород в северные широты. В будущем на основании анализа дескрипторов и принципа декомпозиции планируется разработать алгоритм функционирования FLR-системы.

**Ключевые слова:** восстановление лесных ландшафтов, адаптивное лесовосстановление, справочная система, терминология, страны по площади лесов, страны по активному ведению лесного хозяйства, реляционная модель данных.

**Финансирование:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00102, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/>.

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

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


**Для цитирования:** Новикова, Т. П. Справочная информационная система FLR-Library для адаптивного лесовосстановления: кластерный анализ дескрипторов / Т. П. Новикова, А. И. Новиков, Е. П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 164–179. – Библиогр.: с. 173–179 (48 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>.


Поступила 20.08.2023. Пересмотрена 21.09.2023. Принята 23.09.2023. Опубликована онлайн 30.11.2023.



Review

## FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors

Tatyana P. Novikova ✉, novikova\_tp.vglta@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Arthur I. Novikov, arthur.novikov@vglta.vrn.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Evgeniy P. Petrishchev, petrishchev.vgltu@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>

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

### Abstract

The lack of uniform terminological and technological approaches to the procedure of adaptive reforestation suggests the justification of the principles of creating a reference information system (FLR-Library), taking into account the specifics of implementing a joint decomposed FLR algorithm to reduce its execution time and rational forecasting of future forest landscape restoration projects. Collected and analyzed more than 120 definitions for more than 30 descriptors, such as "forest", "forest landscapes", "adaptive reforestation", "concepts of adaptive reforestation", "reforestation", "afforestation", "stand", "forest plantation", "forest complex", "forest landscape", "type of forest" and others. Both distinctive features and common points in the definitions of different countries and authors of the same descriptor are found. Technically, an approach to clustering of the most common descriptors is implemented: "forest", "forest landscapes", "reforestation", "afforestation". To do this, for each descriptor, based on the hierarchical clustering module, the combination of a cluster of recalibrated distances was determined and a cluster diagram was constructed based on «variables» (criteria for the descriptors effectiveness) and «observations» (by countries containing a source of information with a descriptor). Common to all sources will be that adaptive reforestation implies adaptation to climate change, but then there are two options for development: 1) planting (sowing) breeds resistant to climate change; 2) import and adaptation of "southern" breeds to northern latitudes. In the future, based on the analysis of descriptors and the principle of decomposition, it is planned to develop an algorithm for the functioning of the FLR system.

**Keywords:** restoration of forest landscapes, adaptive reforestation, reference system, terminology, countries by forest area, countries by active forest management, relational data model.

**Funding:** this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-26-00102, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/>.

**Acknowledgments:** the authors thank the reviewers of their contribution to the expert evaluation of the article.

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

**For citation:** Novikova T. P., Novikov A. I., Petrishchev E. P. (2023). FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 164-179 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>.

*Received* 20.08.2023. *Revised* 21.09.2023. *Accepted* 23.09.2023. *Published online* 30.11.2023.

### Введение

Разработке справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-Library) [1] должно предшество-

вать исследование и понимание терминологии лесного хозяйства в странах, занимающих ведущие места по площади лесов (РФ, США, Иран, Индия и др.) [2], либо активно занимающиеся научными исследованиями в области восстановления лесных

ландшафтов (Швеция, Финляндия, Испания, Сербия, Болгария и др.) [3]. Рассмотрение международной терминологии является важным элементом на этапе анализа предметной области для построения моделей и алгоритмов информационной системы (ИС).

*«С биологической точки зрения искусственное лесовосстановление, лесоразведение, содействии естественному лесовозобновлению – это разные процессы, но с технической и математической сторон, если в качестве входных переменных учесть: расположение участка (широту и долготу); высоту над уровнем моря; уклон и т.д. ... , то изменяя переменные в «формуле», описывающей восстановление лесных ландшафтов и, следуя алгоритму лесовосстановления [5,6], можно объединить эти три понятия [4]».* Однако для сбора всех входных переменных (параметров, которые лягут в основу модели и алгоритма FLR-системы) необходим анализ таких дескрипторов, как «лес», «лесные ландшафты», «адаптивное лесовосстановление», «концепции адаптивного лесовосстановления», «лесовосстановление», «лесоразведение» и др.

Дескриптор «концепции адаптивного лесовосстановления | восстановления лесных ландшафтов» представляет широкий интерес для интеграции, по мнению Стефани Мансуриан [10], объединившей 35 соавторов из Женевского университета, Лесной службы (USDA) США, международной организации (IUFRO), Техасского университета, Университета Британской Колумбии, Университета Небраски, Киотского университета, Кембриджского университета, университета Рио-де-Жанейро, Краковского сельскохозяйственного университета, Тюненского университета международного лесного хозяйства и лесной экономики, Эдинбургского университета и ученых из других научных организаций, чтобы оценить реализуемые отраслевые подходы для управления проектами по восстановлению лесов.

Лесные ландшафты [11-13] для большинства стран неразрывно связаны с экономической [14-16] (лесохозяйственное, лесозаготовительное и целлюлозно-бумажное производство) и социальной [17-19] (предоставление экосистемных услуг) деятельностью, поэтому потеря 230 млн га лесов за 10 лет

начиная с 2000 года [20] фокусирует ученых в области лесного хозяйства, лесных фермеров и государство для целей ускоренного (адаптивного) лесовосстановления [21-23], учитывающего риски [24-26] деградации [27-29] и трансформации.

Объединению усилий по восстановлению лесных ландшафтов были призваны способствовать глобальные и крупномасштабные программы по лесовосстановлению (например, Боннский вызов [30-32], кампания ООН «Миллиард деревьев» (2006-), «Африканская инициатива по восстановлению – 100 млн га к 2030 году», «Бразильский пакт о восстановлении атлантических лесов – 15 млн га к 2050 году», и другие программы), наибольший объем которых по площади восстанавливаемых лесов приходится на КНР.

Однако восстановление лесных ландшафтов – это несколько больше, чем посадка деревьев [10]. Это целый комплекс технологий лесовосстановления [33-35], требующих взаимодействия идей, подкрепленных знаниями о создании лесов посадкой [36-37] или посевом [38] с учетом современных технологий тестирования семян [39-41], раннем росте [42] лесных насаждений, использовании перспективных технических средств [43-45] и современных технологий [46]. Комплекс, центральным звеном которого необходимо рассматривать информационную систему [47,48], учитывающие указанные выше дескрипторы лесовосстановления.

Исследование определений данных дескрипторов из различных стран позволит учесть имеющийся международный опыт, поставив цель: собрать максимально возможное количество параметров для будущей FLR-системы, проанализировать, как на данные дескрипторы влияет география и политика государств, осуществляющих активную лесохозяйственную деятельность, как изменяется подход к даче определений дескрипторов во времени?

### Материалы и методы

#### Объект исследования

Дескрипторы данных «лес», «лесные ландшафты», «адаптивное лесовосстановление», «концепции адаптивного лесовосстановления», «лесовосстановление», «лесоразведение» и др.

## *Сбор данных*

Поиск проводили путем ввода ключевых слов на различных научных сайтах с открытым доступом, включая Google Scholar, ELibrary, LENS. Для поиска соответствующих публикаций было использовано множество ключевых слов, таких как «лес», «лесные ландшафты», «адаптивное лесовосстановление», «концепции адаптивного лесовосстановления». Также поиск по данным дескрипторам осуществлялся на сайтах международных организаций, таких как FAO, IUFRO. Было уделено внимание также законодательству различных государств, в случае наличия в них определений «лес», «лесные ландшафты», «адаптивное лесовосстановление», «концепции адаптивного лесовосстановления». Было собрано, проанализировано и обработано более 120 определений, и работа в этом направлении продолжается. Набор данных содержит: название дескриптора на русском языке; название дескриптора на английском языке; аббревиатура (при ее наличии); определение на русском языке; определение на английском языке; автор (при наличии); год; страна; источник; интернет ссылка.

## *Анализ данных*

По результатам поиска отобрали наиболее часто встречающиеся дескрипторы: «лес», «лесовосстановление», «лесной ландшафт», «лесоразведение». По каждому из отображенных дескрипторов были установлены бинарные критерии (0 – нет; 1 – есть) эффективности описания дескриптора.

Применяя статистический программный продукт IBM Statistics v25, по каждому дескриптору создавали таблицу данных, в строках которой устанавливали «наблюдение» (источник определения дескриптора и страна), а в столбцах – «переменные» (критерии оценки дескриптора) и один столбец для подписей данных (страны). Для оценки степени сходства и различия каждого отображенного дескриптора, а также визуализации данных выполняли через интерфейс программного продукта команду {Анализ} – {Классификация} – {Иерархическая кластеризация} сначала с кластеризацией «наблюдений», а затем с кластеризацией «переменных», со следующими параметрами: статистики (порядок агрегации, матрица близостей); графи-

ки (дендрограмма, сосульчатая диаграмма); метод (межгрупповой связи, мера бинарная Жаккара).

## **Результаты и обсуждение**

Первое определение леса, которое встретилось во время исследования, датировано 1895 годом в Постановлении правительства Цейлона – лес означает всю землю, находящуюся в распоряжении короны<sup>3</sup>. Такое определение было обусловлено тем, что Цейлон (сегодня официальное название Демократическая Социалистическая Республика Шри-Ланка) в тот период был британской колонией. Следующее определение леса, данное в Законе о частных лесах Бихара 1947 года также связано с политическими изменениями в Индии, которая до 1947 года также являлась колонией – «означает любую землю, которую правительство штата может путем уведомления объявить лесом для целей настоящего Закона, и считается, что она включает любую землю, которая указана как лес, джунгли...»<sup>4</sup>. Определение леса, как «любая земля под лесами, на которой ни одно лицо не приобрело постоянного, наследственного и передаваемого по наследству права пользования и проживания...»<sup>5</sup> было дано в 1969 году в королевстве Бутан, и также прослеживается влияние на определение «лес» политического строя и уклада общества.

В 1979 году в основе определения леса в Болгарии<sup>6</sup>, – совокупность деревьев на площади земли, а в Греции<sup>7</sup>, добавляется учет местности и рельефа.

Рассмотрение леса с точки зрения взаимодействия его компонентов было представлено в 1985 г. в Лесной энциклопедии СССР – «один из основных типов растительности, состоящий из со-

<sup>3</sup> A revised edition of the ordinances of the Government of Ceylon. Volume II. 1883-1889. Colombo. URL : [https://books.google.ru/books?id=E1JHAAAAYAAJ&pg=PA369&lpg=PA369&dq=%22forest+means%22&source=bl&ots=Wyb5K9BgeN&sig=UxCBQwHldjZw00JjFHmGDauElOU&hl=en&ei=1hFXS57SKsSXtqfwvmv9BA&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&redir\\_esc=y#v=onepage&q=%22forest%20means%22&f=false](https://books.google.ru/books?id=E1JHAAAAYAAJ&pg=PA369&lpg=PA369&dq=%22forest+means%22&source=bl&ots=Wyb5K9BgeN&sig=UxCBQwHldjZw00JjFHmGDauElOU&hl=en&ei=1hFXS57SKsSXtqfwvmv9BA&sa=X&oi=book_result&ct=result&redir_esc=y#v=onepage&q=%22forest%20means%22&f=false)

<sup>4</sup> Bihar Private Forest Act 1947. International Environment House, Chemin de Balexert 7, 1219 Geneva, Switzerland.

<sup>5</sup> Forest regulation / FAO. <https://www.fao.org/3/ad103e/AD103E07.htm>

<sup>6</sup> Даков, М., Вл. Власев. 1979. Общо лесовъдство. с. 382. Земиздат, София. [https://knizhenpazar.net/sold\\_products/books/2719582-obshto-lesovadstvo](https://knizhenpazar.net/sold_products/books/2719582-obshto-lesovadstvo)

<sup>7</sup> Law 998/1979 (FEK A 289). [https://www.culture.gov.gr/el/ministry/SitePages/archeol\\_law.aspx?iID=133](https://www.culture.gov.gr/el/ministry/SitePages/archeol_law.aspx?iID=133)

вокупности древесных, кустарниковых, травянистых и др. растений (мхи, лишайники), включающий животных и микроорганизмы, биологически взаимосвязанных в своем развитии и влияющих друг на друга и на внешнюю среду»<sup>1</sup>.

В определение леса от 1986 года (КНР) нами впервые встречены четкие числовые значения – «лесные угодья, состоящие из древесных пород, с пологом (или сомкнутостью кроны) более 20%»<sup>2</sup>. Далее в определениях леса в: Лесном кодексе Армении (2005 г.); публикации Lund, H. Gyde (coord.) (США, 2006 г.)<sup>3</sup>; Законе о лесе Республики Сербска (Босния и Герцеговина, 2008 г.); Лесном кодексе Румынии (2008 г.); Законе о лесе Болгарии (2011 г.); КНР (ФАО, 2011 г., 2016 г.); Концепции управления лесным хозяйством Венгрии (2018 г.); Иране (ФАО, 2020 г.) приводятся различные числовые параметры: высоты деревьев, площади, ширины участка, процента покрытия земли верхушками деревьев, процента полога, процента сомкнутости и т.п. На первый взгляд может показаться, что применение числовых показателей в определении связано с источником (большинство – это государственные законы представленных стран), однако такая тенденция не прослеживается у их соседей, где в законах нет четких числовых параметров отнесения насаждения к лесу, например в публикациях Лесного и биологического центра охраны дикой природы Турции (2020 г.)<sup>4</sup>, Законе о лесе Турции (2023 г.), Фламандском лесном указе (Бельгия, 2023 г.)<sup>5</sup>, законе 43/2003 Испании (2003 г.)<sup>6</sup>, Законе о лесе (Польша, 2001 г.). Также отсутствуют четкие числовые рамки отнесения лесных насаждений к лесу в определениях: Правительства Индии и Министерства статистики и осуществления программ

(2023 г.)<sup>7</sup>, департамента природных ресурсов Висконсина (США, 2020 г.)<sup>8</sup>, Лесном кодексе РФ (2023 г.)<sup>9</sup>. Кластерный анализ представлен на рис. 1.

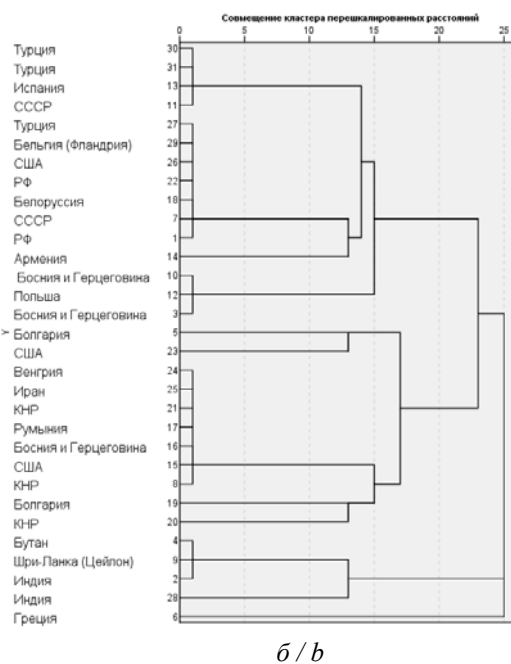
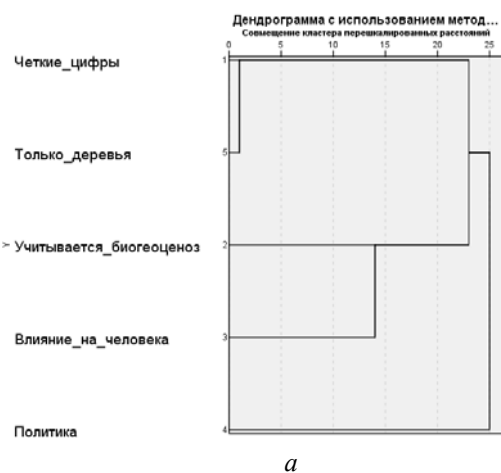


Рисунок 1. Кластерная диаграмма сходства и различия для оценки дескриптора «лес» по критериям (а) и странам (б)

Figure 1. Diagram of similarities and differences for assessing the applicability of «forest» descriptor according to the criteria (a) and country (b)

Источник: собственные результаты авторов

<sup>1</sup> Лесная энциклопедия, т. 1. Советская энциклопедия, Москва, 1985, с. 503.

<sup>2</sup> <https://www.fao.org/3/ca9980en/ca9980en.pdf>

<sup>3</sup> Lund, H. Gyde (coord.) 2006. Definitions of Forest, Deforestation, Afforestation, and Reforestation. Available from the World Wide Web: <http://home.comcast.net/~gyde/DEFpaper.htm>.

<sup>4</sup> Лесной и биологический центр охраны дикой природы ISBN: 978-605-06990-2-9 Ülgen, H., Zeydanlı, U., Lise, Y. (editörler). 2020. Orman ve Biyolojik Çeşitlilik. Doğa Koruma Merkezi, Ankara, 219 sayfa. <https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane-sitesi/Yayinlar/Orman%20ve%20Biyolojik%20Çeşitlilik.pdf>

<sup>5</sup> Flemish Forest Decree. <https://navigator.emis.vito.be/detail?woId=26140&woLang=nl>

<sup>6</sup> Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2003-21339>

<sup>7</sup> Government of India Ministry of Statistics and Programme Implementation. <https://www.mospi.gov.in/45-nine-fold-classification-land-use>

<sup>8</sup> Wisconsin department of natural resources. Notice of final guidance & certification. FA-20-0001. [https://wisconsin.gov/sites/default/files/topic/ForestManagement/24315\\_AppendixA.pdf](https://wisconsin.gov/sites/default/files/topic/ForestManagement/24315_AppendixA.pdf)

<sup>9</sup> Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 N 200-ФЗ (ред. от 04.08.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2023)

Source: own results

Рассмотрение определения дескриптора лесовосстановление охватило временной промежуток с 1989 г. (Греция) до 2023 г. (США, Испания, Бельгия, Турция). Все определения начинались со слова «восстановление», далее «лесов»<sup>1</sup> (энциклопедический словарь лесного хозяйства, Польша, 1996; технические термины о лесе, Венгрия, 2023; ООН, 2023<sup>2</sup>) или «деревьев и древесно-кустарниковой растительности» (департамент природных ресурсов Висконсина, США, 2020 г.; Комитет лесного хозяйства Московской области, РФ, 2018 г.<sup>3</sup>; Фламандский лесной указ, Бельгия, 2023 г. и др.). В некоторых определениях указывается, что исключается естественное возобновление (Греция, 1989 г.<sup>4</sup>), другие источники (Венгрия, 2023 г.<sup>5</sup>; энциклопедический словарь лесного хозяйства, Польша, 1996 г.) наоборот учитывают и естественное возобновление.

На наш взгляд, наиболее оптимальным определением дескриптора «лесовосстановление» является «процесс и мероприятия, направленные на восстановление лесной растительности с преобладанием древесных лесобразующих пород, осуществляемые в течение определенного периода» (Комитет лесного хозяйства Московской области, РФ, 2018 г.), данное определение кратко, но емко характеризует процесс лесовосстановления, в отличие, например от «облесение в границах лесов» (Главное управление лесного хозяйства Министерства сельского хозяйства, Турция, 2023 г.<sup>6</sup>).

Кластерный анализ дескриптора «лесовосстановление» по критериям упоминания в определении: только деревьев, деревьев и древесно-кустарниковой растительности, исключение есте-

ственного возобновления, упоминание посадки/посева представлен на рис. 2.

Определения дескриптора «лесной ландшафт» были рассмотрены с 2008 по 2023 годы. К наиболее интересному и сложному для однозначной интерпретации относится определение «это централизованная, четко структурированная система, где обязательно имеется руководящий элювиальный центр и серия подчиненных элементарных геохимических ландшафтов, чьи свойства определяются многими, в том числе и водными связями между ядром и сопряженными компонентами» [7].

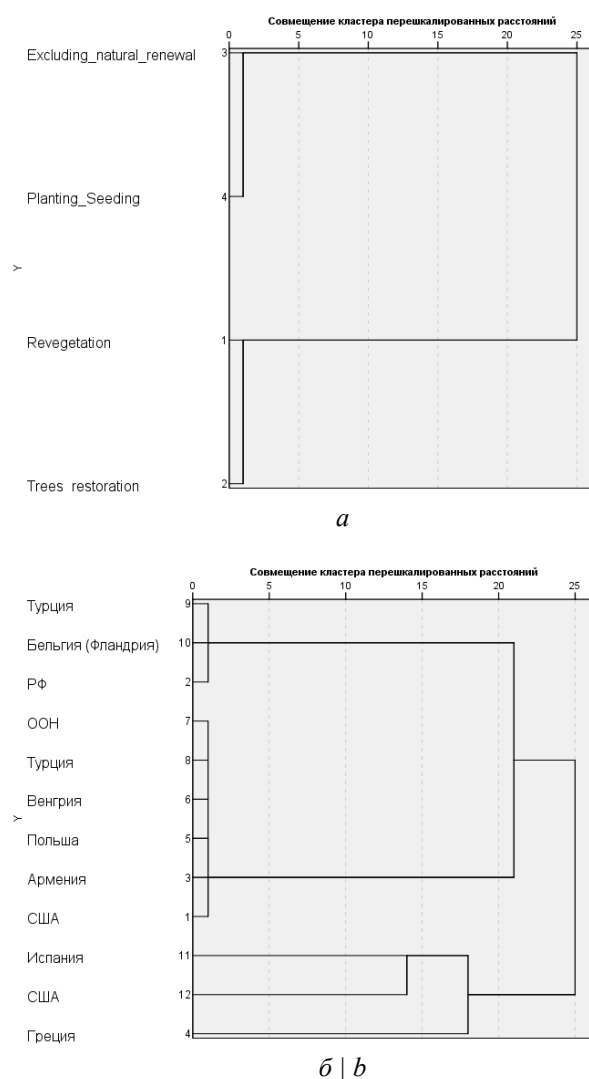


Рисунок 2. Кластерная диаграмма сходства и различия для оценки дескриптора «лесовосстановление» по критериям (а) и странам (б)

Figure 2. Diagram of similarities and differences for assessing the applicability of «reforestation» descriptor according to the criteria (a) and country (b)

<sup>1</sup> Hatzistathis A., Dafis S. 1989. Reforestations-Forest Nurseries, 265 p., Yiahoudi Publishing, Thessaloniki (in Greek).

<sup>2</sup> The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is the United Nations body for assessing the science related to climate change.

[https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/land\\_use/index.php?idp=48](https://archive.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=48)

<sup>3</sup> Комитет лесного хозяйства Московской области, РФ, 2018. <https://klh.mosreg.ru/deyatelnost/vosproizvodstvo-lesov-i-lesorazvedenie/vosproizvodstvo-lesov/06-11-2018-17-51-34-lesovosstanovlenie>

<sup>4</sup> Hatzistathis A., Dafis S. 1989. Reforestations-Forest Nurseries, 265 p., Yiahoudi Publishing, Thessaloniki (in Greek).

<sup>5</sup> Технические термины о лесе, Венгрия, 2023. <https://parkerdo.hu/erdogazdalkodas/tudnivalok/erdeszeti-szakkifejezesek/#>

<sup>6</sup> <https://kutuphane.tarimorman.gov.tr/vufind/Record/19597/Details>

Источник: собственные результаты авторов  
Source: own results

Более понятным выступает определение автора М. Петровой, Болгария, 2019 г.: «Сложная природно-территориальная система, объединяющая в себе природные компоненты, с одной стороны, и деятельность человека – с другой» [8], однако данное определение является общим и не характеризует именно лесные ландшафты.

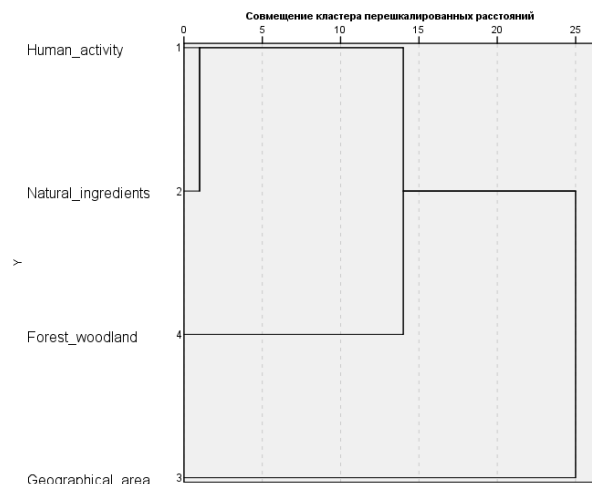
С точки зрения рассмотрения определения лесного ландшафта заслуживает внимания определение Петроса Ганатсаса (2022 г., факультет лесного хозяйства и природной среды университета Аристотеля в Салониках) «набор характерных элементов, характеризующих лесную местность, таких как: растительность, топографический рельеф, вода и элементы присутствия человека»<sup>1</sup>. Подобная интерпретация определения дана и Фоминой Н.В. (2020 г., Красноярск, РФ): «взаимосвязанный комплекс различных природных компонентов: материнской породы, рельефа, почвы, растительности и др.»<sup>2</sup>.

Коллектив авторов, занимающихся дистанционным зондированием лесных ландшафтов также дал определение лесного ландшафта, заслуживающее внимания «определяется как непрерывное пространство природных экосистем в районах существующих лесов, без признаков значительной человеческой деятельности и площадью не менее 500 км<sup>2</sup>»<sup>3</sup>.

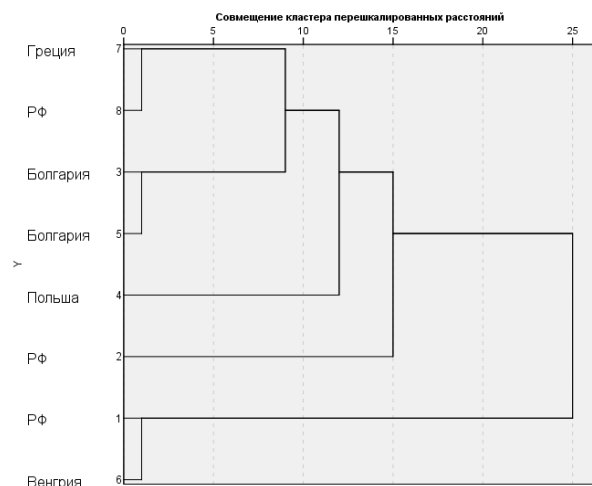
Кластерный анализ дескриптора «лесной ландшафт» по критериям упоминания в определении: деятельности человека, лес/лесной местности, природных компонентов, географического района и рельефа местности представлен на рисунке 3.

Концепция адаптивного лесовосстановления встречается в 2007 году в работе Степен. Е (Поль-

ша)<sup>4</sup>, в которой идет речь о мерах влияния на насаждения, подвергающиеся промышленному загрязнению и другим антропогенным воздействиям. Принятие таких мер направлено на снижение уровня риска лесопроизводства за счет повышения устойчивости лесных насаждений, состав и структура которых аналогичны естественным лесным сообществам, характерным для данных условий обитания. В качестве мер была предложена диверсификации видового состава древостоя.



a



б | б

Рисунок 3. Кластерная диаграмма сходства и различия для оценки дескриптора «лесной ландшафт» по критериям (а) и странам (б)

<sup>1</sup> <https://www.researchgate.net/profile/Petros-Ganatsas/research>

<sup>2</sup> Основы лесопаркового хозяйства [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Н.В. Фомина; Красноярск. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2020. – 256 с. <http://www.kgau.ru/new/student/43/content/69.pdf>

<sup>3</sup> Potapov, P., Yaroshenko, A., Turubanova, S., Dubinin, M., Laestadius, L., Thies, C., ... & Zhuravleva, I. (2008). Mapping the world's intact forest landscapes by remote sensing. *Ecology and Society*, 13(2).

[https://www.researchgate.net/publication/42763581\\_Mapping\\_the\\_Worlds\\_Intact\\_Forest\\_Landscapes\\_by\\_Remote\\_Sensing](https://www.researchgate.net/publication/42763581_Mapping_the_Worlds_Intact_Forest_Landscapes_by_Remote_Sensing)

<sup>4</sup> Stępień E. Wybrane problemy planowania przebudowy lasu. *Sylwan* nr 5: 32–43, 2007. <https://journals.indexpublish.com/search/article?articleId=89966>

Figure 3. Diagram of similarities and differences for assessing the applicability of «forest landscape» descriptor according to the criteria (a) and country (b)

Источник: собственные результаты авторов  
Source: own results

В условиях изменения климата адаптивное лесовосстановление приобрело другой смысл. В работе канадских авторов [9] в 2018 году была описана вспомогательная миграция в качестве адаптивного метода лесовосстановления «посадка видов в новых районах, которые, как ожидается, в будущем будут подходящими с климатической точки зрения. Этот подход известен как вспомогательная миграция и определяется в лесном хозяйстве как «преднамеренное антропогенное перемещение отдельных лиц и популяций».

В 2020 году Northwest Natural Resource Group<sup>1</sup> дало определение адаптивному лесовосстановлению, как «стратегии естественного лесовосстановления с целью адаптации к изменению климата, направленная на снижение уязвимости к потенциальным или ожидаемым воздействиям (рискам и неопределенностям), вызванным изменением климата».

Швейцарский федеральный Институт лесных, снежных и ландшафтных исследований в 2021 году курировал научный проект «Эксперимент по пересадке в масштабах всего ареала с использованием коллективной науки и геномного прогнозирования для оценки местной адаптации лесных деревьев» (координатор Николь Понта), целью которого было выявить основные закономерности и движущие силы адаптации и построить прогностическую модель для выбора оптимальных источников семян для конкретного местоположения.

Фламандский лесной указ (Бельгия) указывает на использование рекомендованных, устойчивых к изменению климата сортов, которые отбираются Научно-исследовательским институтом природы и леса (INBO) и включаются в официальный список рекомендуемых сортов. «Использование рекомендованных сортов не является обязатель-

ным, но является строгим условием для подачи заявки на получение субсидии на облесение».

Общим для всех источников будет то, что адаптивное лесовосстановление подразумевает адаптацию к изменению климата, но далее существует два варианта развития: 1) посадка (посев) пород, устойчивых к изменению климата; 2) завоз и адаптация «южных» пород в северные широты.

Во введении было указано условие объединения трех терминов, одним из которых является лесоразведение. Определения дескриптора «лесоразведение» были рассмотрены с 1996 г. (Польша)<sup>2</sup> «внедрение леса на нелесные земли, ранее использовавшиеся для сельского хозяйства или временно пустующие» по 2023 г. (Греция)<sup>3</sup> «создание лесов путем посадки и/или преднамеренного засева на землях, которые до этого находились в другом землепользовании, что подразумевает изменение землепользования с нелесного на лесное». Дескриптор «лесоразведение» был рассмотрен на основе законов Болгарии, Испании, Венгрии, Армении, Турции, России; во всех определениях однозначно было указано, что лесоразведение проводится на нелесных землях, в 50 % определений фигурировало слово «посадка/посев». Лишь в одном определении присутствовала цель проведения лесоразведения – «создание лесных насаждений на землях, ранее не занятых лесной растительностью, в целях предотвращения водной, ветровой или иной эрозии почв и для других защитных целей, связанных с повышением потенциала территории»<sup>4</sup> (2022 г., Россия). Также интерес представляет определение лесоразведения, данное Организацией Объединенных Наций – «посадка новых лесов на землях, на которых исторически не было лесов»<sup>5</sup>, 2023 г.

<sup>2</sup> Энциклопедический словарь лесного хозяйства, лесного хозяйства, охраны окружающей среды, охоты и смежных областей. Коллективная работа под ред. Издательство SGGW. Варшава, 1996. <https://www.encyklopedialesna.pl/hasla/?t2f=Zalesianie&w2f=hasla>

<sup>3</sup> Государственный портал Греции. <https://ypen.gov.gr/derivallon/dasi/dasotechnika-erga-anadasoseis-fytoria/>

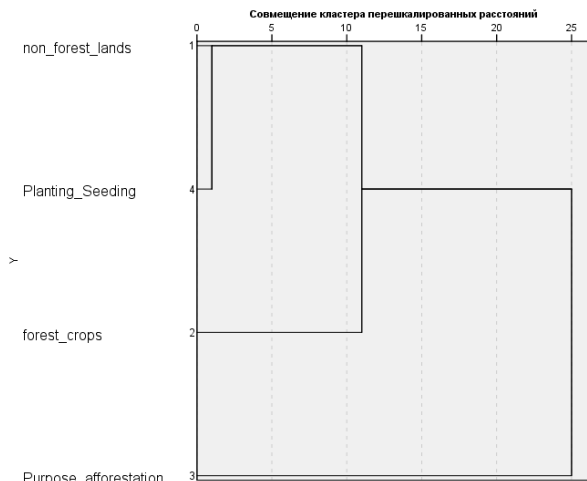
<sup>4</sup> п. 3.22 ГОСТ 34826-2022 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Линейная часть. Организация и производство строительно-монтажных работ», введенный в действие приказом Росстандарта от 15 февраля 2022 № 68-ст <https://docs.cntd.ru/document/1200183245>

<sup>5</sup> The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is the United Nations body for assessing the science related to climate

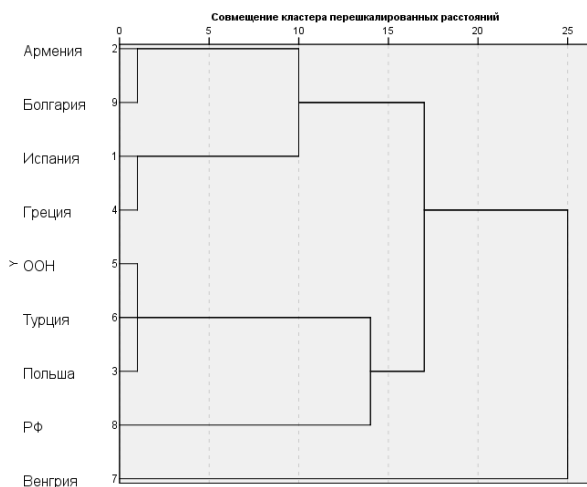
<sup>1</sup> <https://www.nnrg.org/stossel-creek-case-study-adaptive-restoration-for-pacific-northwest-forests/>

Кластерный анализ дескриптора «лесоразведение» по критериям упоминания в определении: нелесные земли, искусственные лесные культуры, цель лесоразведения, посадка/посев представлен на рис. 4.

Набор данных лег в основу реляционной модели базы данных (рис. 5) справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-Library).



а



б | б

Рисунок 4. Кластерная диаграмма сходства и различия для оценки дескриптора «лесоразведение» по критериям (а) и странам (б)

Figure 4. Diagram of similarities and differences for assessing the applicability of «afforestation» descriptor according to the criteria (a) and country (b)

Источник: собственные результаты авторов  
Source: own results

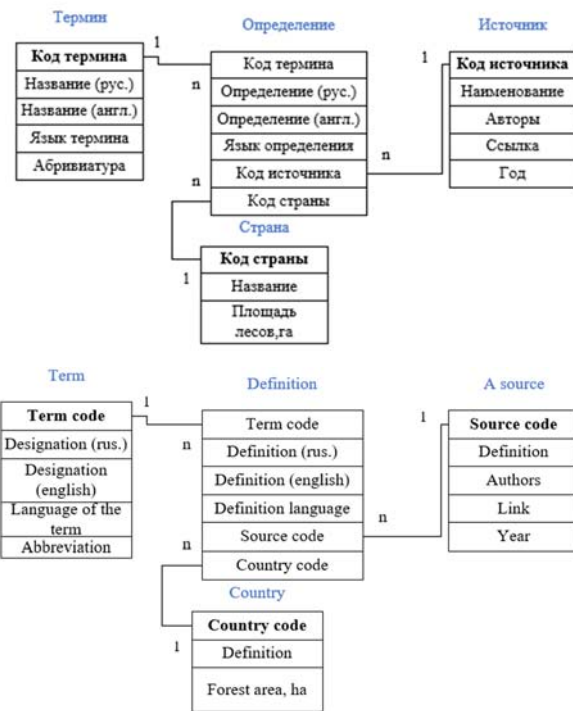


Рисунок 5 – Реляционная модель для базы данных дескрипторов «лес», «лесные ландшафты», «адаптивное лесовосстановление» и др.

Figure 5 – Relational model for the database of descriptors "forest", "forest landscapes", "adaptive reforestation", etc.

Источник: собственные результаты авторов  
Source: own results

Набор данных планируется разместить в репозитории Mendeley Data.

### Заключение

В результате исследования было собрано и проанализировано более 120 определений для более 30 дескрипторов, таких как «лес», «лесные ландшафты», «адаптивное лесовосстановление», «концепции адаптивного лесовосстановления», «лесовосстановление», «лесоразведение», «древесный лес», «древостой», «лесное насаждение», «лесной комплекс», «лесной ландшафт», «тип леса» и др. Были найдены как отличительные черты, так и общие моменты в определениях различных стран и авторов одного дескриптора, как правило, это было связано с годом формулировки определения; политическим строем и социальным укладом страны; уровнем развития общества и, как следствие, увеличением антропогенного воздействия на лесные ландшафты; уровнем влияния изменением климата на конкретную территорию и др.



### Список литературы

1. Новикова, Т. П. Разработка справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-library) // НИР: грант № 23-26-00102. Российский научный фонд. 2023. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53916036>
2. Экспресс-анализ семян в лесохозяйственном производстве: теоретические и технологические аспекты / А. И. Новиков, М. В. Драпалюк, С. В. Соколов, Т. П. Новикова. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – 176 с. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48309574>
3. Novikov, A. I. Non-Destructive Quality Control of Forest Seeds in Globalization: Problems and Prospects of Output Innovative Products / A. I. Novikov, T. P. Novikova // Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecke Teplice, Slovak Republic, 10–11 октября 2018 года. – Rajecke Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 1260-1267. <https://www.elibrary.ru/vscqou>.
4. Новикова, Т. П. Оценка качества лесосеменного материала на экспериментальном участке сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при адаптивном восстановлении лесных ландшафтов / Т. П. Новикова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1(49). – С. 112-128. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53814693>
5. Новикова, Т. П. Исследование набора технологических операций подготовки семенного материала хвойных пород для лесовосстановления // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 4(44). – С. 150-160. – DOI <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/13>.
6. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // Inventions. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
7. Литогенная основа продуктивности Воронежской нагорной дубравы / Г. А. Одроралов, Е. Н. Тихонова, О. В. Трегубов, И. В. Голядкина // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т. 7, № 2(26). – С. 26-34. – DOI 10.12737/article\_5967e8e01143e9.03067340. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29825780>
8. Mariya Petrova. Self-restoration of landscapes: theoretical and practical aspects // Journal of the Bulgarian Geographical Society Volume 41 (2019) 18–22. [https://geography.bg/images/JBGS/vol41\\_2019/JBGS\\_vol41\\_2019\\_Petrova\\_M.pdf?t=1623427631](https://geography.bg/images/JBGS/vol41_2019/JBGS_vol41_2019_Petrova_M.pdf?t=1623427631)
9. Peterson St-Laurent, G., Hagerman, S. & Kozak, R. What risks matter? Public views about assisted migration and other climate-adaptive reforestation strategies. *Climatic Change* 151, Pp. 573–587, (2018). <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2310-3>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-018-2310-3>
10. Mansourian, S. Putting the pieces together: Integration for forest landscape restoration implementation / S. Mansourian, J. Parrotta, P. Balaji et al. // *Land Degradation & Development*. – 2020. – Vol. 31. – № 4. – P. 419-429. – DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3448>.
11. Cruz, D.C. da. An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon / D.C. da Cruz, J.M.R. Benayas, G.C. Ferreira et al. // *New Forests*. – 2021. – Vol. 52. – № 1. – P. 1-16. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09777-3>.
12. Lombaerde, E. De. Understorey removal effects on tree regeneration in temperate forests: a meta-analysis / E. De Lombaerde, L. Baeten, K. Verheyen et al. // *Journal of Applied Ecology*. – 2020. – P. 1365-2664.13792. – DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13792>.
13. Wilson, S.J. Governing restoration: Strategies, adaptations and innovations for tomorrow’s forest landscapes / S.J. Wilson, D. Cagalanan // *World Development Perspectives*. – 2016. – Vol. 4. – P. 11-15. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2016.11.015>.
14. Ager, A.A. Economic Opportunities and Trade-Offs in Collaborative Forest Landscape Restoration / A. A. Ager, K.C. Vogler, M.A. Day, J.D. Bailey // *Ecological Economics*. – 2017. – Vol. 136. – P. 226-239. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.01.001>.

15. Govindarajulu, D. Rights based approaches to forest landscape restoration; learning from the Indian forest policy experience / D. Govindarajulu, R. Pritchard, A. Chhatre et al. // *Forest Policy and Economics*. – 2023. – Vol. 157. – P. 103073. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103073>.
16. Obiri, B.D. Farmers' perceptions of herbicide usage in forest landscape restoration programs in Ghana / B.D. Obiri, E.A. Obeng, K.A. Oduro et al. // *Scientific African*. – 2021. – Vol. 11. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00672>.
17. Hani, N. Adaptive forest landscape restoration as a contribution to more resilient ecosystems in the Shouf Biosphere Reserve (Lebanon) / N. Hani, P. Regato, R. Colomer et al. // *Plant Sociology*. – 2017. – Vol. 54. – № 1. – P. 111-118. – DOI: <https://doi.org/10.7338/pls2017541S1/14>.
18. Caglayan, İ. A decision making approach for assignment of ecosystem services to forest management units: A case study in northwest Turkey / İ. Caglayan, A. Yeşil, Ö. Kabak, P. Bettinger // *Ecological Indicators*. – 2021. – Vol. 121. – P. 107056. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107056>.
19. Díaz-Yáñez, O. Multi-objective forestry increases the production of ecosystem services / O. Díaz-Yáñez, T. Pukkala, P. Packalen et al. // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. – 2020. – Vol. 94. – № 3. – P. 386-394. – DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa041>.
20. Hansen, M.C. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change / M.C. Hansen, P. V. Potapov, R. Moore et al. // *Science*. – 2013. – Vol. 342. – № 6160. – P. 850-853. – DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1244693>. – Mode of access: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1244693>.
21. Dudley, N. A stepwise approach to increasing ecological complexity in forest landscape restoration / N. Dudley, S. Maginnis // *Ecological Restoration*. – 2018. – Vol. 36. – № 3. – P. 174-176. – DOI: <https://doi.org/10.3368/er.36.3.174>.
22. Spathelf, P. Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration / P. Spathelf, J. Stanturf, M. Kleine et al. // *Annals of Forest Science*. – 2018. – Vol. 75. – № 2. – P. 55. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4>.
23. Hani, N. Old abandoned terraces surveying and restoration as a contribution to the adaptive forest landscape restoration in Lebanon / N. Hani, P. Regato, M. Pagliani et al. // *Acta Horticulturae*. – 2021. – Vol. 1324. – № 1324. – P. 219-224. – DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1324.34>.
24. Julia Ihli, H. Risk and time preferences for participating in forest landscape restoration: The case of coffee farmers in Uganda / H. Julia Ihli, B. Chiputwa, E. Winter, A. Gassner // *World Development*. – 2022. – Vol. 150. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105713>.
25. McColl-Gausden, S.C. Future fire regimes increase risks to obligate-seeder forests / S.C. McColl-Gausden, L.T. Bennett, D.A. Ababei et al. // *Diversity and Distributions*. – 2022. – Vol. 28. – № 3. – P. 542-558. – DOI: <https://doi.org/10.1111/ddi.13417>.
26. Stanturf, J.A. Forest landscape restoration: building on the past for future success / J.A. Stanturf // *Restoration Ecology*. – 2021. – Vol. 29. – № 4. – DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13349>.
27. Ghazoul, J. Degradation and Recovery in Changing Forest Landscapes: A Multiscale Conceptual Framework. Vol. 42 / J. Ghazoul, R. Chazdon. – *Ecosystem Management, Department of Environmental Systems Science, ETH Zurich, Zurich, 8092, Switzerland* : Annual Reviews Inc., 2017. – DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060736>.
28. Stanturf, J.A. Landscape degradation and restoration / J.A. Stanturf // *Soils and Landscape Restoration* / J.A. Stanturf ed. – Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 2021. – P. 125-159. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813193-0.00005-9>.
29. Labelle, E.R. The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance / E.R. Labelle, B.J. Poltorak, D. Jaeger // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2019. – Vol. 49. – № 2. – P. 164-178. – DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0324>.

30. Stanturf, J.A. Implementing forest landscape restoration under the Bonn Challenge: a systematic approach / J.A. Stanturf, M. Kleine, S. Mansourian et al. // *Annals of Forest Science*. – 2019. – Vol. 76. – № 2. – P. 50. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0833-z>.
31. Verdone, M. Time, space, place, and the Bonn Challenge global forest restoration target / M. Verdone, A. Seidl // *Restoration Ecology*. – 2017. – Vol. 25. – № 6. – P. 903-911. – DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12512>.
32. Stanturf, J.A. Implementing forest landscape restoration under the Bonn Challenge: a systematic approach / J.A. Stanturf, M. Kleine, S. Mansourian et al. // *Annals of Forest Science*. – 2019. – Vol. 76. – № 2. – P. 50. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0833-z>.
33. Novikov, A.I. Production of Complex Knowledgebased Systems: Optimal Distribution of Labor Resources Management in the Globalization Context / A. I. Novikov [et al.] // *Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecke Teplice, Slovak Republic*. – Rajecke Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 2275-2281. – URL: <https://www.elibrary.ru/yxkpw>.
34. Патент № 2714705 Российская Федерация, МПК А01G 23/00. Способ восстановления леса : № 2019115418 : заявл. 20.05.2019 : опубл. 19.02.2020 / А. И. Новиков. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/gzdlvj>.
35. Novikova, T. P. Economic evaluation of mathematical methods application in the management systems of electronic component base development for forest machines / T. P. Novikova, A. I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 392. – P. 012035. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012035>.
36. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / V. Ivetic [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. – Vol. 226. – P. 012043. – DOI [10.1088/1755-1315/226/1/012043](https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012043).
37. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / V. A. Zelikov [et al.] // *Forests*. – 2019. – Vol. 10, No. 12. – P. 1064. – DOI [10.3390/F10121064](https://doi.org/10.3390/F10121064).
38. Влияние индивидуальной массы семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30-дневное прорастание в 40-ячейковых SideSlit-контейнерах / С.В. Ребко [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2023. – Vol. 13. – № 2 (50). – P. 59-86. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4>.
39. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: mathematical modeling / M. Tigabu et al. // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – № 2. – P. 240. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020240>.
40. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis / B.T. Ersson, V.V. Malyshev et al. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – Vol. 595. – P. 012060. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012060>.
41. The Effect of Motion Time of a Scots Pine Single Seed on Mobile Optoelectronic Grader Efficiency: A Mathematical Patterning / M.V. Drapalyuk, O.R. Dornyak et al. // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4. – № 4. – P. 55. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4040055>.
42. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature / P. Tylek, C.B. Mastrangelo et al. // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – № 6. – P. 1164. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061164>.
43. How to Increase the Analog-to-Digital Converter Speed in Optoelectronic Systems of the Seed Quality Rapid Analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamensky [et al.] // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/dkxphx>.
44. How Can the Engineering Parameters of the NIR Grader Affect the Efficiency of Seed Grading? / C.B. Mastrangelo, P. Tylek et al. // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12. – № 12. – P. 2125. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12122125>.

45. Соколов, С. В. Новые оптоэлектронные системы экспресс-анализа семян в лесохозяйственном производстве / С. В. Соколов [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9, № 2(34). – С. 5-13. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/1. – <https://www.elibrary.ru/CNXAWZ>.

46. Bernardes, R.C. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology / R.C. Bernardes, A. De Medeiros, L. da Silva et al. // Agriculture. – 2022. – Vol. 12. – № 11. – P. 1801. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111801.2>. Novikov, A. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: mathematical modeling / A. Novikov, V. Lisitsyn, M. Tigabu et al. // Forests. – 2021. – Vol. 12. – № 2. – P. 240. – DOI: <https://doi.org/10.3390/fl2020240>.

47. Scots pine seedlings growth dynamics data reveals properties for the future proof of seed coat color grading conjecture / V. Ivetić [et al.] // Data. – 2019. – Vol. 4, No. 3. – P. 106. – DOI 10.3390/data4030106. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/PAJOVZ>.

48. Разработка алгоритма и модели функционирования информационной системы для малого сельскохозяйственного предприятия / Т. В. Новикова [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 4. С. 53-58. DOI 10.12737/2219-0767-2021-13-4-53-58. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/qdcyju>.

### References

1. Novikova, T. P. Development of a reference information system for adaptive restoration of forest landscapes (FOR-library) // NIR: grant No. 23-26-00102. Russian Science Foundation. 2023. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53916036>

2. Express analysis of seeds in forestry production: theoretical and technological aspects / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, S. V. Sokolov, T. P. Novikova. – Voronezh : Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2022. – 176 p. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48309574>

3. Novikov, A. I. Non-Destructive Quality Control of Forest Seeds in Globalization: Problems and Prospects of Output Innovative Products / A. I. Novikov, T. P. Novikova // Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecke Teplice, Slovak Republic, 10–11 октября 2018 года. – Rajecke Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 1260-1267. <https://www.elibrary.ru/vscqou>.

4. Novikova, T. P. Assessment of the quality of forest seed material on an experimental plot of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) during adaptive restoration of forest landscapes / T. P. Novikova // Forestry Journal. – 2023. – Vol. 13, No. 1(49). – pp. 112-128. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53814693>

5. Novikova, T. P. Investigation of a set of technological operations for the preparation of seed material of coniferous species for reforestation // Forestry Journal. – 2021. – Vol. 11, No. 4(44). – pp. 150-160. – DOI <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/13>

6. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // Inventions. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.

7. Lithogenic basis of productivity of the Voronezh upland oak grove / G. A. Odnoralov, E. N. Tikhonova, O. V. Tregubov, I. V. Golyadkina // Forestry Journal. – 2017. – vol. 7, No. 2(26). – pp. 26-34. – DOI 10.12737/article\_5967e8e01143e9.03067340. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29825780>

8. Mariya Petrova Self-restoration of landscapes: theoretical and practical aspects // Journal of the Bulgarian Geographical Society Volume 41 (2019) 18–22. [https://geography.bg/images/JBGS/vol41\\_2019/JBGS\\_vol41\\_2019\\_Petrova\\_M.pdf?t=1623427631](https://geography.bg/images/JBGS/vol41_2019/JBGS_vol41_2019_Petrova_M.pdf?t=1623427631)

9. Peterson St-Laurent, G., Hagerman, S. & Kozak, R. What risks matter? Public views about assisted migration and other climate-adaptive reforestation strategies. Climatic Change 151, Pp. 573–587, (2018). <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2310-3>. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-018-2310-3>

10. Mansourian, S. Putting the pieces together: Integration for forest landscape restoration implementation / S. Mansourian, J. Parrotta, P. Balaji et al. // Land Degradation & Development. – 2020. – Vol. 31. – № 4. – P. 419-429. – DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3448>.

11. Cruz, D.C. da. An overview of forest loss and restoration in the Brazilian Amazon / D.C. da Cruz, J.M.R. Benayas, G.C. Ferreira et al. // *New Forests*. – 2021. – Vol. 52. – № 1. – P. 1-16. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09777-3>.
12. Lombaerde, E. De. Understorey removal effects on tree regeneration in temperate forests: a meta-analysis / E. De Lombaerde, L. Baeten, K. Verheyen et al. // *Journal of Applied Ecology*. – 2020. – P. 1365-2664.13792. – DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13792>.
13. Wilson, S.J. Governing restoration: Strategies, adaptations and innovations for tomorrow's forest landscapes / S.J. Wilson, D. Cagalanan // *World Development Perspectives*. – 2016. – Vol. 4. – P. 11-15. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2016.11.015>.
14. Ager, A.A. Economic Opportunities and Trade-Offs in Collaborative Forest Landscape Restoration / A.A. Ager, K.C. Vogler, M.A. Day, J.D. Bailey // *Ecological Economics*. – 2017. – Vol. 136. – P. 226-239. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.01.001>.
15. Govindarajulu, D. Rights based approaches to forest landscape restoration; learning from the Indian forest policy experience / D. Govindarajulu, R. Pritchard, A. Chhatre et al. // *Forest Policy and Economics*. – 2023. – Vol. 157. – P. 103073. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103073>.
16. Obiri, B.D. Farmers' perceptions of herbicide usage in forest landscape restoration programs in Ghana / B.D. Obiri, E.A. Obeng, K.A. Oduro et al. // *Scientific African*. – 2021. – Vol. 11. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00672>.
17. Hani, N. Adaptive forest landscape restoration as a contribution to more resilient ecosystems in the Shouf Biosphere Reserve (Lebanon) / N. Hani, P. Regato, R. Colomer et al. // *Plant Sociology*. – 2017. – Vol. 54. – № 1. – P. 111-118. – DOI: <https://doi.org/10.7338/pls2017541S1/14>.
18. Caglayan, İ. A decision making approach for assignment of ecosystem services to forest management units: A case study in northwest Turkey / İ. Caglayan, A. Yeşil, Ö. Kabak, P. Bettinger // *Ecological Indicators*. – 2021. – Vol. 121. – P. 107056. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107056>.
19. Díaz-Yáñez, O. Multi-objective forestry increases the production of ecosystem services / O. Díaz-Yáñez, T. Pukkala, P. Packalen et al. // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. – 2020. – Vol. 94. – № 3. – P. 386-394. – DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa041>.
20. Hansen, M.C. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change / M. C. Hansen, P. V. Potapov, R. Moore et al. // *Science*. – 2013. – Vol. 342. – № 6160. – P. 850-853. – DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1244693>. – Mode of access: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1244693>.
21. Dudley, N. A stepwise approach to increasing ecological complexity in forest landscape restoration / N. Dudley, S. Maginnis // *Ecological Restoration*. – 2018. – Vol. 36. – № 3. – P. 174-176. – DOI: <https://doi.org/10.3368/er.36.3.174>.
22. Spathelf, P. Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration / P. Spathelf, J. Stanturf, M. Kleine et al. // *Annals of Forest Science*. – 2018. – Vol. 75. – № 2. – P. 55. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4>.
23. Hani, N. Old abandoned terraces surveying and restoration as a contribution to the adaptive forest landscape restoration in Lebanon / N. Hani, P. Regato, M. Pagliani et al. // *Acta Horticulturae*. – 2021. – Vol. 1324. – № 1324. – P. 219-224. – DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1324.34>.
24. Julia Ihli, H. Risk and time preferences for participating in forest landscape restoration: The case of coffee farmers in Uganda / H. Julia Ihli, B. Chiputwa, E. Winter, A. Gassner // *World Development*. – 2022. – Vol. 150. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105713>.
25. McColl-Gausden, S.C. Future fire regimes increase risks to obligate-seeder forests / S.C. McColl-Gausden, L.T. Bennett, D.A. Ababei et al. // *Diversity and Distributions*. – 2022. – Vol. 28. – № 3. – P. 542-558. – DOI: <https://doi.org/10.1111/ddi.13417>.
26. Stanturf, J.A. Forest landscape restoration: building on the past for future success / J.A. Stanturf // *Restoration Ecology*. – 2021. – Vol. 29. – № 4. – DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13349>.

27. Ghazoul, J. Degradation and Recovery in Changing Forest Landscapes: A Multiscale Conceptual Framework. Vol. 42 / J. Ghazoul, R. Chazdon. – Ecosystem Management, Department of Environmental Systems Science, ETH Zurich, Zurich, 8092, Switzerland : Annual Reviews Inc., 2017. – DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060736>.
28. Stanturf, J.A. Landscape degradation and restoration / J.A. Stanturf // Soils and Landscape Restoration / J.A. Stanturf ed. . – Amsterdam, Netherlands : Elsevier, 2021. – P. 125-159. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813193-0.00005-9>.
29. Labelle, E.R. The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance / E.R. Labelle, B.J. Poltorak, D. Jaeger // Canadian Journal of Forest Research. – 2019. – Vol. 49. – № 2. – P. 164-178. – DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0324>.
30. Stanturf, J.A. Implementing forest landscape restoration under the Bonn Challenge: a systematic approach / J.A. Stanturf, M. Kleine, S. Mansourian et al. // Annals of Forest Science. – 2019. – Vol. 76. – № 2. – P. 50. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0833-z>.
31. Verdone, M. Time, space, place, and the Bonn Challenge global forest restoration target / M. Verdone, A. Seidl // Restoration Ecology. – 2017. – Vol. 25. – № 6. – P. 903-911. – DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12512>.
32. Stanturf, J.A. Implementing forest landscape restoration under the Bonn Challenge: a systematic approach / J.A. Stanturf, M. Kleine, S. Mansourian et al. // Annals of Forest Science. – 2019. – Vol. 76. – № 2. – P. 50. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0833-z>.
33. Novikov, A.I. Production of Complex Knowledgebased Systems: Optimal Distribution of Labor Resources Management in the Globalization Context / A. I. Novikov [et al.] // Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecké Teplice, Slovak Republic. – Rajecké Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 2275-2281. – URL: <https://www.elibrary.ru/yxkpw>.
34. Patent No. 2714705 Russian Federation. Method of forest restoration / A. I. Novikov. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/gzdlvj>.
35. Novikova, T. P. Economic evaluation of mathematical methods application in the management systems of electronic component base development for forest machines / T. P. Novikova, A. I. Novikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 392. – P. 012035. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012035>.
36. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / V. Ivetic [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. – Vol. 226. – P. 012043. – DOI [10.1088/1755-1315/226/1/012043](https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012043).
37. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / V. A. Zelikov [et al.] // Forests. – 2019. – Vol. 10, No. 12. – P. 1064. – DOI [10.3390/F10121064](https://doi.org/10.3390/F10121064).
38. The effect of the individual seed mass of Negorelskaya variety Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on 30-day germination in 40-cell sideslit growing containers / S.U. Rabko [et al.] // Forestry Engineering journal. – 2023. – Vol. 13. – № 2 (50). – P. 59-86. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4>.
39. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: mathematical modeling / M. Tigabu et al. // Forests. – 2021. – Vol. 12. – № 2. – P. 240. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020240>.
40. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis / B.T. Ersson, V.V. Malyshev et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 595. – P. 012060. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012060>.
41. The Effect of Motion Time of a Scots Pine Single Seed on Mobile Optoelectronic Grader Efficiency: A Mathematical Patterning / M.V. Drapalyuk, O.R. Dorniyak et al. // Inventions. – 2019. – Vol. 4. – № 4. – P. 55. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4040055>.
42. The Root Collar Diameter Growth Reveals a Strong Relationship with the Height Growth of Juvenile Scots Pine Trees from Seeds Differentiated by Spectrometric Feature / P. Tylek, C.B. Mastrangelo et al. // Forests. – 2023. – Vol. 14. – № 6. – P. 1164. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14061164>.

43. How to Increase the Analog-to-Digital Converter Speed in Optoelectronic Systems of the Seed Quality Rapid Analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamensky [et al.] // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/dkxphx>.

44. How Can the Engineering Parameters of the NIR Grader Affect the Efficiency of Seed Grading? / C.B. Mastrangelo, P. Tylek et al. // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12. – № 12. – P. 2125. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12122125>.

45. New optoelectronic systems for express analysis of seeds in forestry production / S.V. Sokolov [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9, № 2(34). – P. 5-13. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/1. – <https://www.elibrary.ru/CNXAWZ>.

46. Bernardes, R.C. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology / R.C. Bernardes, A. De Medeiros, L. da Silva et al. // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12. – № 11. – P. 1801. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111801.2>. Novikov, A. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: mathematical modeling / A. Novikov, V. Lisitsyn, M. Tigabu et al. // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – № 2. – P. 240. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020240>.

47. Scots pine seedlings growth dynamics data reveals properties for the future proof of seed coat color grading conjecture / V. Ivetić [et al.] // *Data*. – 2019. – Vol. 4, No. 3. – P. 106. – DOI 10.3390/data4030106. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/PAJOVZ>.

48. Development of an algorithm and a model of the functioning of an information system for a small agricultural enterprise / T. V. Novikova [et al.] // *Modeling of systems and processes*. – 2020. – Vol. 13, No. 4. pp. 53-58. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-13-4-53-58. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/qdcyjuv>.

### Сведения об авторах

✉ *Новикова Татьяна Петровна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru).

*Новиков Артур Игоревич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: [arthur.novikov@vglta.vrn.ru](mailto:arthur.novikov@vglta.vrn.ru).

*Петрищев Евгений Петрович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>, e-mail: [petrishchev.vglta@mail.ru](mailto:petrishchev.vglta@mail.ru).

### Information about the authors

✉ *Tatyana P. Novikova* – Cand. Sci. (Technical), Docent, Chair of Computer Technology and Microelectronic Engineering, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh 394087, Russian Federation, 394087, <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru).

*Arthur I. Novikov* – Dr Sci. (Tech.), professor, Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: [arthur.novikov@vglta.vrn.ru](mailto:arthur.novikov@vglta.vrn.ru).

*Evgeniy P. Petrishchev* – Postgraduate Student (Tech.), Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva, Voronezh 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>, e-mail: [petrishchev.vglta@mail.ru](mailto:petrishchev.vglta@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/13>

УДК 630 + 621.225:69.002.51



## Обоснование перспективной схемы кривошипного гидромотора для гидропривода опорно-поворотного устройства манипулятора лесовозного автопоезда

Валерий И. Посметьев<sup>1</sup>, posmetyev@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Вадим О. Никонов<sup>1</sup>✉, 8888nike8888@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Виктор В. Посметьев<sup>1</sup>, victorvpo@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Владимир А. Зеликов<sup>1</sup>, zelikov-vrn@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Петр И. Попиков<sup>1</sup>, popikovpetr@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Петр В. Колодий<sup>2</sup>, pkolody@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-6418-1531>

Александр А. Михайлов<sup>3</sup>, mikhaylov\_a.a@mail.ru <https://orcid.org/0009-0004-1575-4013>

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

<sup>2</sup>Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, ул. Мазурова, 59/34, г. Гомель, 246053, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Филиал ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», ул. Урицкого, д. 75а, г. Воронеж, 394026, Российская Федерация

Задача повышения эффективности гидроманипуляторов с традиционными механизмами поворота колонны, устанавливаемых на лесовозных автопоездах, может быть решена установкой поворотных механизмов колонны с кривошипными гидромоторами от гидроцилиндров. Варианты расположения гидроцилиндров в кривошипном гидромоторе исследовались графоаналитически определением касательных и радиальных усилий, действующих на поворотную колонну гидроманипулятора. Вначале выполнялись расчеты на основе методов статики для оценки действия усилий на штоках гидроцилиндров в рабочих положениях механизма поворота колонны. После при помощи системы автоматизированного проектирования КОМПАС осуществлялось построение круговых диаграмм касательных и радиальных усилий рассматриваемых вариантов расположения гидроцилиндров в кривошипном гидромоторе. Далее в программе Microsoft Excel осуществлялось построение графиков изменения касательных усилий, действующих на поворотную колонну гидроманипулятора. Наилучшим вариантом действующих усилий на подшипники, в которых проворачивается колонна, обладают схемы с пятью и шестью гидроцилиндрами. Диапазоны изменения радиальных усилий для них составили соответственно от 3,32 до 22,07 кН и от 11,175 до 11,297 кН, а касательных усилий – от 257,893 до 285,274 кН и от 300,471 до 354,059 кН, что может быть использовано при проектировании новых конструкций приводов для поворота колонн гидроманипуляторов. Для практической реализации предлагаемой конструкции кривошипного гидромотора планируется на основе имитационного моделирования осуществить рациональный выбор месторасположения гидроцилиндров кривошипного гидромотора на раме лесовозного автопоезда.

**Ключевые слова:** лесовозный автопоезд, кривошипный гидромотор, манипулятор, опорно-поворотное устройство, механизм поворота колонны, статика, гидравлический цилиндр двухстороннего действия, рециркуляция энергии рабочей жидкости, управление гидроприводом.



**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке локального гранта ФГБОУ ВО ВГЛТУ.

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

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



**Для цитирования:** Обоснование перспективной схемы кривошипного гидромотора для гидропривода опорно-поворотного устройства манипулятора лесовозного автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, В. А. Зеликов, П. И. Попиков, П. В. Колодий, А. А. Михайлов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 180–199. – Библиогр.: с. 195–198 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/13>.


*Поступила* 12.04.2023. *Пересмотрена* 29.10.2023. *Принята* 12.11.2023. *Опубликована онлайн* 30.11.2023.

Article

### Substantiation of a perspective scheme of a crank hydraulic motor for a hydraulic drive of a turntable of a logging truck manipulator

Valerii I. Posmetev<sup>1</sup>, [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Vadim O. Nikonov<sup>1</sup> , [8888nike8888@mail.ru](mailto:8888nike8888@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Viktor V. Posmetev<sup>1</sup>, [victorvpo@mail.ru](mailto:victorvpo@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Vladimir A. Zelikov<sup>1</sup>, [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Petr I. Popikov<sup>1</sup>, [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Petr V. Kolodii<sup>2</sup>, [pkolody@mail.ru](mailto:pkolody@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-6418-1531>

Aleksandr A. Mihailov<sup>3</sup>, [mikhaylov\\_a.a@mail.ru](mailto:mikhaylov_a.a@mail.ru)  <https://orcid.org/0009-0004-1575-4013>

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

<sup>2</sup>F. Skorina Gomel State University, st. Mazurova – 59/34, Gomel, 246053, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Branch of the Rostov State Transport University, st. Uritskogo, 75 a, Voronezh, 394026, Russian Federation

#### Abstract

The task of increasing the efficiency of hydraulic manipulators with traditional column turning mechanisms installed on logging road trains can be solved by installing column turning mechanisms with crank hydraulic motors from hydraulic cylinders. Variants of the arrangement of hydraulic cylinders in a crank hydraulic motor were studied graph analytically by determining tangential and radial forces acting on the rotary column of the hydraulic manipulator. At first, calculations were performed based on static methods to evaluate the effect of forces on the rods of hydraulic cylinders in the working positions of the column rotation mechanism. After that, using the COMPASS computer-aided design system, circular diagrams of tangential and radial forces of the considered options for the arrangement of hydraulic cylinders in a crank hydraulic motor were constructed. Further, in the Microsoft Excel program, graphs of changes in tangential forces acting on the rotary column of the hydraulic manipulator were plotted. Schemes with five and six hydraulic cylinders have the best option of influencing the bearings in which the column is rotated. The ranges of radial forces for them ranged, respectively, from 3.32 to 22.07 kN and from 11.175 to 11.297 kN, and tangential forces – from 257.893 to 285.274 kN, and from 300.471 to 354.059 kN, which can be used in the design of new drive designs for turning columns of hydraulic manipulators. For the practical implementation of the proposed design of the crank hydraulic motor, it is planned to make a rational choice of the location of the hydraulic cylinders of the crank hydraulic motor on the frame of the logging road train on the basis of simulation modeling.

**Keywords:** logging road train, crank hydraulic motor, manipulator, turntable, column turning mechanism, statics, double-acting hydraulic cylinder, working fluid energy recovery, hydraulic drive control.

**Funding:** the research supported by a local grant from the FSBEI HE VSUFT.

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

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

**For citation:** Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Zelikov V. A., Popikov P. I., Kolodii P. V., Mihailov A. A. (2023) Substantiation of a perspective scheme of a crank hydraulic motor for a hydraulic drive of a turntable of a logging truck manipulator. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 180-199 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/13>.

*Received* 12.04.2023. *Revised* 29.10.2023. *Accepted* 12.11.2023. *Published online* 30.11.2023.

### Введение

Увеличение объемов заготавливаемых и вывозимых лесоматериалов неразрывно связано с совершенствованием устанавливаемых на лесовозные автопоезда (ЛА) гидравлических манипуляторов (ГМ), а также повышением их производительности при одновременном снижении затрат на содержание и ремонт. Такое совершенствование в итоге позволит за счет сокращения удельных затрат на процесс погрузки и разгрузки лесоматериалов значительно снизить себестоимость их вывозки конечным потребителям [1, 2].

Различные аспекты повышения эффективности работы ГМ рассматриваются во многих научных статьях отечественных и зарубежных авторов.

Min Cheng и др. (2021) в своей научной работе рассмотрели вопрос согласованного управления траекторией рабочего органа ГМ, осуществляемого на основе алгоритма динамического программирования оптимизации потока рабочей жидкости, подаваемой в гидроцилиндры (ГЦ) при сокращении времени операций поворота, подъема и опускания, повышении скорости перемещения рабочего органа ГМ, безопасности, а также снижении энергопотребления. Для разработки предложенного алгоритма работы, способного повысить эффективность ГМ, на первом этапе для теоретического исследования создана математическая модель ГМ с семью степенями свободы. На втором этапе – осуществлена экспериментальная проверка опытного образца ГМ. Установлено, что использование такого алгоритма дает возможность снизить на 9,85 % поток рабочей жидкости, на 310,3 Вт среднее значение мощности, а также увеличить на 7,52 % среднюю скорость рабочего органа ГМ [3].

В статье Duc-Thien Tran и др. (2019) рассмотрена проблема управления звеньями ГМ, заключающаяся в неопределенности динамики электрогидравлического привода, которая оказывает влияние на эффективность управления и стабильность работы всей системы. С целью повышения точности перемещения звеньев ГМ, обеспечения оптимальной полезной нагрузки, минимизации утечек в электрогидравлическом приводе, предложено адаптивное управление для отслеживания положения звеньев ГМ, а также динамики электрогидравлического привода. Адаптивное управление основано на нейронной сети радиальных базисных функций. Экспериментальное исследование, выполненное на испытательном стенде, показало, что предлагаемое адаптивное управление ГМ аппроксимирует неопределенности, что повышает точность характеристик управления [4].

В работе Karam Dad Kallu (2019) предложена двухсторонняя система дистанционного управления ГМ с обратной связью, включающая в себя камеру, используемую для получения визуальной информации о рабочем пространстве. Такое управление оценивает силу реакции ведущего и ведомого звеньев для улучшения позиционирования ГМ. Экспериментальное исследование показывает, что ГМ с такой системой дистанционного управления точно следует заданной траектории движения [5].

Noai Vu Anh Truong и др. (2019) в статье предлагают адаптивное управление положением ГМ с тремя степенями свободы и с широким диапазоном изменения полезной нагрузки, которая достигается за счет применения в качестве первичных генераторов крутящего момента электрогидравлических приводов. Применение таких приводов, не-

смотря на их характеристики нелинейности и параметры неопределенности, обеспечивает высокие значения жесткости и отношений мощности к весу [6].

В другой работе Noai Vu Anh Truong и др. (2019) рассмотрели вопрос повышения производительности, надежности и безопасности адаптивно управляемого ГМ. Предложен метод обнаружения неисправностей и повышения безопасной работы при решении проблемы внезапной потери контакта в процессе работы серийного ГМ, приводимого в действие электрогидравлическими приводами. При потере контакта для предотвращения повреждения системы или непроизвольного движения, потенциальная энергия, запасенная в ЦЦ каждого звена ГМ, мгновенно высвобождается [7].

Markku Suomalainen и др. (2018) рассмотрели проблему дистанционного управления ГМ, функционирующего в сложных природно-климатических условиях окружающей среды. Такое управление положением захватного звена ГМ в пространстве при контакте с перемещаемым объектом в некоторых случаях, связанных с увеличением ошибок местоположения сопровождается негативными последствиями воздействия на окружающую среду. Избежать это, по мнению авторов, можно путем использования податливости системы, заключающейся в возможности ГМ отклоняться от запланированной траектории при возникающих ограничениях в процессе перемещения. Предложен метод двухстороннего дистанционного телеуправления, повышающий точность, стабильность и безопасность автономного управления за счет учета силы ГМ при оценке контакта между захватным звеном и перемещаемым объектом [8].

Shizhao Zhou и др. (2022) исследовали проблему ограничения применения двухстороннего телеуправления гидравлическим приводом ГМ, функционирующего в сложных условиях работы, характеризуемых различными внешними возмущениями. Это сопровождается недостаточной точностью работы оператора, отправляющего команды с ведущего на ведомые элементы системы, осуществляющей управление ГМ. Предложен метод телеуправления, основанный на линейном неточном управлении движением звеньев ГМ. Результа-

ты эксперимента показывают, что предложенный метод управления удовлетворяет требованиям телеоперации ГМ с максимальной точностью работы до 0,02 м [9].

Jarmo Nurmi и др. (2017) в рассмотрели актуальную научную задачу, связанную с полуавтоматическим управлением ГМ, облегчающим загруженность оператора в процессе выполнения многократно повторяющихся операций управления подъемом, опусканием и поворотом ГМ. Приведено обоснование необходимости повышения эффективности работы ГМ за счет минимизации энергопотребления исполнительными механизмами ГМ путем оптимального управления перемещением звеньев ГМ, а также их скоростью подъема, опускания и поворота. Экспериментальное исследование работы ГМ с предложенной системой оптимального управления показало, что ее использование позволяет сократить на 15-30 % общее количество гидравлической энергии, затрачиваемой на операции подъема, опускания и поворота ГМ в сравнении с традиционной системой управления [10].

Haо Zhou и др. (2023) рассмотрели проблему гибкой деформации ГМ с большим ходом, которая оказывает значительное влияние на точное управление положением рабочих органов в декартовом пространстве. С целью решения вышеуказанной проблемы предложена модель обратной кинематики, в основе которой лежит его упругая деформация при расположении звеньев ГМ в начальном положении. Применение предлагаемой модели позволяет избежать сложного гибкого многозвенного моделирования и идентификации параметров, а также предоставляет возможность точно управлять ГМ с большим ходом в пределах заданной области пространства [11].

Xiaohua Wei и др. (2023) рассмотрели вопрос адаптивного динамического моделирования управлением манипулятором с гидравлическим сервоприводом при различной массе полезной нагрузки. Предложен метод управления таким манипулятором, позволяющий точно отслеживать требуемую траекторию, подавлять вынужденные вибрации манипулятора, а также оптимизировать его энергопотребление [12].

Rohit Dhakate и др. (2022) представили автономный метод управления манипулятором с гидравлическим приводом, обеспечивающий точность отслеживания траектории, повышение производительности процесса погрузки и разгрузки лесоматериалов. Основным преимуществом предлагаемого метода управления является требуемая минимальная системная информация и отсутствие необходимости математического обоснования кинематики и динамики движения рассматриваемого манипулятора [13].

MyoungHo Kim и др. (2021) в своей статье разработали метод моделирования ГМ в режиме реального времени. Данный метод учитывает работу гидравлического привода, механической системы, процессы демпфирования и трения, позволяет оценивать эффективность управления. Использование этого метода в процессе исследования операций подъема и опускания грузов позволяет в сравнении с физическим экспериментом сократить затраты денежных средств и времени, а также повысить производительность при сохранении высокой точности [14].

Pengfei Li и Yong Li (2023) предложили и исследовали на основе моделирования в системе MATLAB / Simulink новую конструкцию ГМ, управляемого электрогидравлической сервосистемой. Разработан алгоритм управления электрогидравлической сервосистемой ГМ. Предметом исследования являлось достижение оптимального управления и нахождение требуемой для этого параметров ГМ. Результаты моделирования показывают, что предлагаемый ГМ с нечетким пропорционально-интегрально-дифференцирующим управлением электрогидравлической сервосистемы обладает высокой стабильностью за счет эффективной оптимизации и настройки параметров, а также улучшенной производительностью [15].

Pavlov A.I. и др. (2020) рассмотрели вопрос надежности работы ГМ, от которой зависит не только их конкурентоспособность, но и предотвращение загрязнения окружающей среды при аварийном сбросе рабочей жидкости. Также, ими обоснована постоянно возрастающая потребность в разработке новых методов контроля надежности и технического состояния гидравлических элементов

ГМ. Предложен колебательный метод контроля технического состояния гидроцилиндров ГМ, основанный на анализе законов динамических процессов, протекающих в гидроцилиндрах при различных их технических состояниях. Использование такого метода позволит определить целесообразность дальнейшей эксплуатации гидроцилиндров ГМ [16].

Ruqi Ding и др. (2019) рассмотрели проблему недостаточной энергоэффективности из-за существенных потерь потенциальной энергии (механических и объемных потерь насоса, потерь на дросселирование в клапанах) в процессе работы гидравлического привода мобильного манипулятора с большой нагрузкой. Предложена энергоэффективная многорежимная система управления электрогидравлическим приводом манипулятора, включающая в себя независимый дозирующий клапан и насос с электронным управлением. Такая система позволяет оптимизировать потенциальные потери энергии на входе и на выходе электрогидравлического привода, а также улучшить точность управления манипулятором. В сравнении с традиционной системой управления гидравлического привода, предлагаемая система для типичного рабочего цикла манипулятора обеспечивает коэффициенты энергоэффективности 25,8 и 35,3 % соответственно [17].

Анализ результатов исследований зарубежных авторов, научная работа которых связана с изучением различных аспектов повышения эффективности работы ГМ, позволил установить, что значительное улучшение их работы может быть достигнуто за счет: согласованного управления траекторией движения рабочего органа ГМ, обеспечивающего повышение скорости перемещения рабочего органа, сокращение времени на выполнение операций подъема, опускания и поворота, и, как следствие, снижение энергопотребления; повышения точности перемещений и позиционирования звеньев ГМ, обеспечения оптимальной полезной нагрузки, а также минимизации утечек в гидроприводе; улучшения энергоэффективности за счет оптимизации потерь потенциальной энергии в процессе работы гидропривода ГМ.

В настоящее время модельный ряд ГМ постоянно расширяется, пополняясь новыми образцами, широко востребованными для установки на ЛА. Тяжелые условия работы ГМ, характеризующиеся внешними механическими воздействиями, пускотормозным и реверсивным режимами функционирования, передачей высоких нагрузок из-за превышения грузовых характеристик и неравномерным распределением напряжений сопровождаются снижением их работоспособности. Одним из наиболее сложных в ремонте и ответственных узлов ГМ, определяющих его надежную и безопасную работу, является опорно-поворотное устройство (ОПУ) [18].

Наибольшее распространение в конструкциях ГМ, выпускаемых многими странами мира получили ОПУ с механизмами поворота колонны на основе реечных передач. В этих устройствах поворота колонны функцию привода механической передачи выполняют ГЦ одно и двухстороннего действия, которые за счет кинематики передачи усилий между зубчатыми рейками и зубчатым колесом преобразуют поступательное движение во вращательное.

Зубчатые рейки такой конструкции с ГЦ их перемещения устанавливаются на основании ГМ, а зубчатое колесо на поворотной колонне. При этом их герметизация осуществляется за счет применения специального корпуса, который заполняется смазочным материалом до заданного уровня. Это обстоятельство значительно усложняет доступ к деталям реечной передачи при осуществлении планового технического обслуживания, и в большинстве случаев требует полной разборки поворотного механизма колонны. Также, недостаточно совершенные системы смазки, подобные рассматриваемым поворотным устройствам допускают неоправданно повышенное трение зубчатой рейки в направляющей, что особенно сказывается в зимний период эксплуатации ГМ. Дополнительно к этому, такие поворотные устройства колонны имеют значительные габаритные размеры, ограниченный угол поворота колонны и увеличенную массу. Также, выявлено, что остановка поворотной колонны ГМ в крайних положениях преимущественно протекает очень жестко, и сопровождается возникно-

ванием динамических нагрузок, действующих на элементы конструкции ГМ. Причиной этому является резкое заклинивание рабочей жидкости в конце хода поршней ГЦ реечной передачи. Для снижения таких динамических нагрузок приходится использовать различные системы демпфирования [19].

Одним из перспективных направлений, позволяющих повысить эффективность ОПУ, является разработка и исследование поворотных механизмов колонны с кривошипными гидромоторами от различного числа ГЦ. Использование таких ОПУ позволит повысить надежность за счет снижения воздействующих динамических нагрузок при пускотормозных режимах работы, упростить конструкцию, уменьшить массу и габаритные размеры, снизить трение, и соответственно, увеличить коэффициент полезного действия, улучшить равномерность угловой скорости поворота при различных значениях нагрузки, упростить технологический процесс изготовления ОПУ, сократить время пребывания в ремонте, повысить точность позиционирования ГМ, даст возможность преобразовывать и накапливать при тормозных режимах работы ГМ энергию рабочей жидкости для последующего полезного использования с целью снижения энергозатрат на процесс погрузки и разгрузки лесоматериалов [20].

Создание конструкций новых ОПУ ГМ при постоянном повышении требований к их эксплуатационным характеристикам требует решения многих теоретических и практических задач. Целью работы является выявление на основании анализа построения круговых диаграмм, учитывающих касательные и радиальные усилия, действующие на ОПУ ГМ, оптимального варианта количества ГЦ и их расположения в кривошипном гидроприводе поворотного механизма колонны.

### **Материалы и методы**

#### *Предмет и объект исследований*

Объектом исследования является кривошипный гидромотор для гидропривода ОПУ ГМ лесовозного автопоезда. Предметом исследования являются зависимости изменения усилий, действующих на поворотную колонну ГМ с таким гидромотором от заданного количества ГЦ.

Согласно ГОСТ 17752 РФ, кривошипный гидропривод относится к радиально-поршневым гидромоторам, в которых движение от поршней к выходному звену передается кривошипно-шатунным механизмом.

В качестве аналога для выбора исходных данных при выполнении расчетов принимался ГМ ММ-90 с грузовым моментом  $90 \text{ кН} \cdot \text{м}$ , производителем которого является Майкопский машиностроительный завод. Такой ГМ может устанавливаться на различные базовые ЛА зарубежного и российского производства.

*Дизайн эксперимента*

Исследование базировалось на графоаналитическом методе определения касательных и радиальных усилий, действующих на поворотную колонну ГМ с кривошипным гидромотором от заданного количества ГЦ. Расчеты выполнялись на основе методов статики, позволивших на этапе поиско-

вых исследований приблизительно оценить действие усилий на штоках ГЦ в рабочих положениях механизма поворота колонны ГМ. При расчетах были приняты следующие допущения: трение в шарнирах и плоскостях скольжения отсутствует; влияние моментов со стороны стрелы, грейферного захвата и груза и инерционность срабатывания ГЦ не учитывались.

На первом этапе перед выполнением расчетов были проанализированы возможные варианты конструктивного исполнения ГЦ, которые можно использовать в кривошипном гидромоторе поворотного механизма ГМ (рис. 1). Наиболее приемлемым вариантом при прочих равных условиях является использование гидроцилиндров двухстороннего действия (рис. 1, а), так как они обладают простотой конструкции и меньшими массогабаритными параметрами.

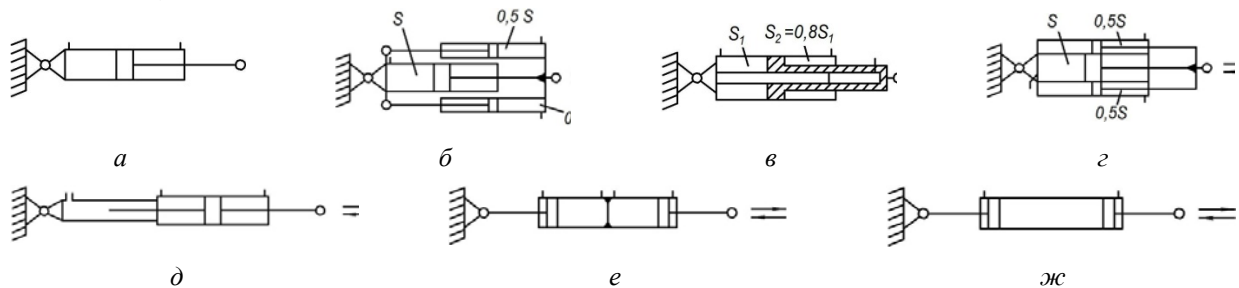


Рисунок 1. Схемы ГЦ для кривошипного гидромотора ОПУ ГМ: б, г, д – схемы с равными усилиями на штоках; в – плунжер с функцией мультипликатора давления  
 Figure 1. HC schemes for crank hydraulic motor SD HM: б, д, е – schemes with equal efforts on the rods; в – plunger with pressure multiplier function

Источник: собственная схема авторов  
 Source: authors' own schema

На втором этапе исследования были рассмотрены возможные варианты изменяемых усилий для анализируемых схем расположения ГЦ в кривошипном гидромоторе ОПУ ГМ (рис. 2).

На третьем этапе применительно к наиболее распространенному по основным параметрам ГМ, были выбраны следующие исходные данные для расчета:  $D_{ш} = 80 \text{ мм}$  и  $D_{ц} = 40 \text{ мм}$  – рабочий диаметр ГЦ и диаметр его штока, соответственно (рис. 3, б);  $P = 20 \text{ МПа}$  – номинальное давление рабочей жидкости;  $\beta = 120^\circ$  – угол между осями ГЦ в их первом положении (рис. 3, б);  $l_k = 150 \text{ мм}$  – длина кривошипа;  $l_1 = 208 \text{ мм}$  и  $l_2 = 360 \text{ мм}$  – координаты шарнира 3 в его первом положении относительно шарниров  $O_1$  и  $O_2$  крепления ГЦ на раме

ЛА;  $L = 720 \text{ мм}$  – расстояние между шарнирами крепления ГЦ на раме ЛА (рис. 3).

На четвертом этапе были определены составляющие  $F_1$  и  $F_2$  усилия  $F$  на штоке ГЦ двухстороннего действия для рабочих положений механизма поворота колонны ГМ. Сила  $F_1$  определялась для оценки момента поворота колонны со стрелой и грузом, а сила  $F_2$  – для определения максимальных значений нагрузок на подшипники, в которых поворачивается колонна.

Значения составляющих усилий  $F_1$  и  $F_2$  определялись из следующих выражений:

$$F_1 = F \cdot \sin \alpha; F_2 = F \cdot \cos \alpha. \quad (1)$$

Величины усилий на штоке при его выдвигании  $F_{выд}$  и втягивании  $F_{вт}$  из цилиндра определялись соответственно из выражений

$$F_{\text{выд}} = P \cdot \pi \cdot (D_{\text{ц}}/2)^2; F_{\text{вт}} = P \cdot \pi \cdot (D_{\text{ш}}/2)^2. \quad (2)$$

После подстановки получим Н:

– усилие на штоке при выдвигании:

$$F_{\text{выд}} = 20 \cdot 3,14 \cdot 40^2 = 100480;$$

– усилие на штоке при втягивании:

$$F_{\text{вт}} = 20 \cdot (S_n - S_{\text{шт}}) =$$

$$= 20 \cdot (3,14 \cdot 40^2 - 3,14 \cdot 20^2) = 75360.$$

Знаки нормального усилия  $F_2$  следующие: –

со знаком плюс при направлении силы наружу от оси колонны и со знаком минус при направлении силы внутрь.

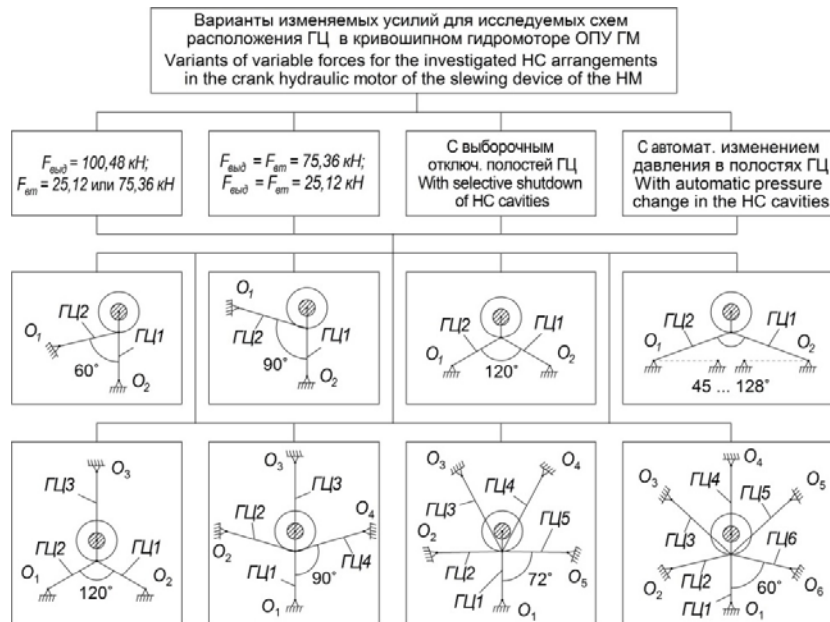


Рисунок 2. Схема исследуемых вариантов расположения ГЦ в кривошипном гидромоторе

Figure 2. Scheme of the studied options for the location of the HC in the crank hydraulic motor

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

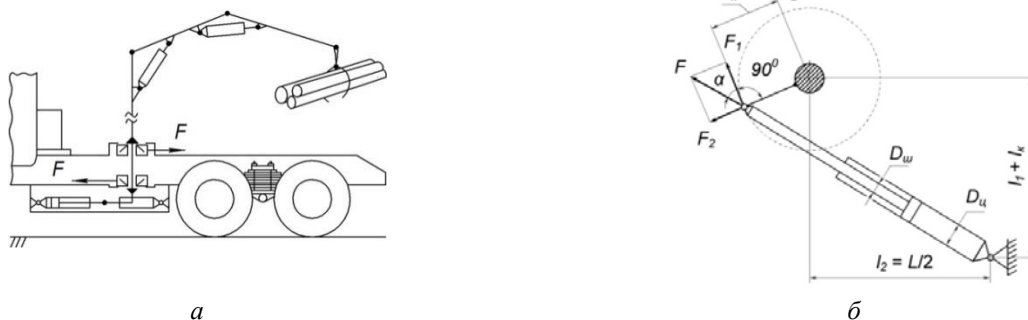


Рисунок 3. Схема размещения кривошипного гидромотора ОПУ ГМ на ЛА (а) и схема для определения усилий  $F_1$  и  $F_2$  на штоке ГЦ механизма поворота колонны ГМ (б)

Figure 3. Layout of the crank hydraulic motor of the turntable of the manipulator on a timber truck (a) and the diagram for determining the forces  $F_1$  and  $F_2$  on the HC rod of the HM column rotation mechanism (b)

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Анализ данных

Полученные результаты косвенных измерений радиальных и касательных усилий, изменяющихся от угла поворота колонны ГМ, статистиче-

ски обрабатывались методом, основанным на раздельной обработке аргументов и их погрешностей.

На завершающем этапе расчета при помощи системы проектирования САПР КОМПАС осуществлялось построение круговых диаграмм кас-



тельных и радиальных усилий рассматриваемых вариантов расположения ГЦ в кривошипном гидромоторе. Далее в программе Microsoft Excel осуществлялось построение графиков изменения касательных усилий, действующих на поворотную колонну гидроманипулятора.

Круговая диаграмма представляет собой зависимость радиальных усилий, действующих на подшипники кривошипного гидромотора, в функции рабочих положений механизма поворота колонны ГМ. На основании развернутых диаграмм определяли изменение радиальных и касательных усилий. Анализ изменения таких усилий служит критерием приближенной оценки работоспособности подшипников кривошипного гидромотора механизма поворота колонны ГМ. Кроме этого, круговые диаграммы также дают наглядное представление о распределении давления усилий на подшипники поворотного механизма колонны.

Результаты

Полученные графоаналитическим методом круговые диаграммы, радиальных  $\sum F_2$  усилий, действующих на поворотную колонну ГМ с кривошипным гидромотором для исследуемого количества и расположения ГЦ приведены на рис. 4, 6, 8.

При построении круговых диаграмм в каждой рассматриваемой схеме кривошипного гидромотора учитывались мертвые положения механизма по рабочим ГЦ. Соответствующие расчетные значения радиальных  $\sum F_2$  усилий для исследуемых положений кривошипного гидромотора ОПУ ГМ представлены в табл. 1-3.

Графики изменения касательных  $\sum F_1$  усилий, действующих на кривошипный гидромотор ОПУ ГМ лесовозного автомобиля, приведены на рис. 5, 7, 9.

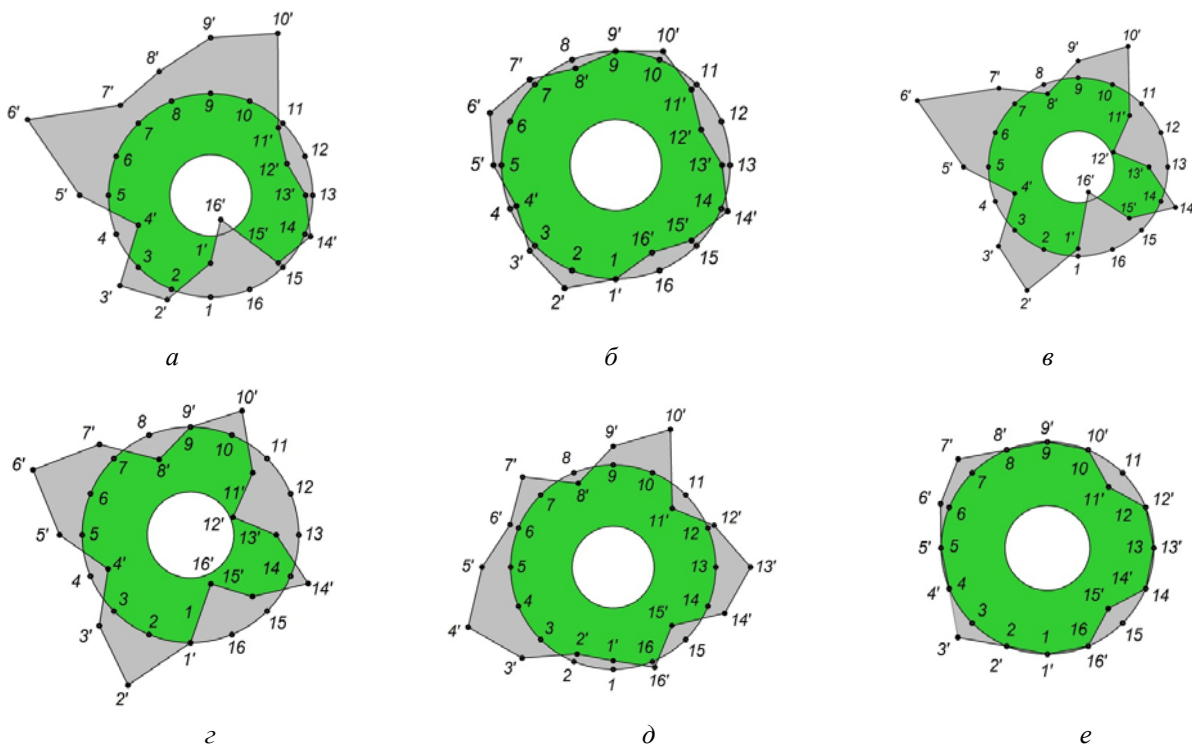


Рисунок 4. Диаграммы радиальных усилий, действующих на поворотную колонну ГМ с кривошипным гидромотором от двух ГЦ, расположенных в начальном положении под углом  $120^\circ$ : а –  $F_{ввод} = 100,48$  кН,  $F_{от} = 25,12$  кН; б –  $F_{ввод} = 25,12$  кН,  $F_{от} = 25,12$  кН; в –  $F_{ввод} = 100,48$  кН,  $F_{от} = 75,36$  кН; г –  $F_{ввод} = 75,36$  кН,  $F_{от} = 75,36$  кН; д –  $F_{ввод} = 100,48$  кН,  $F_{от} = 75,36$  кН (с выборочным отключением полостей ГЦ); е –  $F_{ввод} = 100,48$  кН,  $F_{от} = 75,36$  кН (с автоматическим изменением давления в полостях ГЦ)

Figure 4. Diagrams of radial forces acting on the HM rotary column with a crank hydraulic motor from two HC located in the initial position at an angle  $120^\circ$ : а –  $F_{input} = 100.48$  kN,  $F_w = 25.12$  kN; б –  $F_{input} = 25.12$  kN,  $F_w = 25.12$  kN; в –  $F_{input} = 100.48$  kN,  $F_w = 75.36$  kN; г –  $F_{input} = 75.36$  kN,  $F_w = 75.36$  kN; д –  $F_{input} = 100.48$  kN,  $F_w = 75.36$  kN (with selective shutdown of the HC cavities); е –  $F_{input} = 100.48$  kN,  $F_w = 75.36$  kN (with automatic pressure change in the HC cavities)

Источник: собственные схемы авторов / Source: authors' own schemes



Результаты расчета радиальных усилий  $\sum F_2$  на штоках ГЦ в исследуемых положениях кривошипного гидромотора ОПУ ГМ ЛА (два ГЦ, расположенных в начальных положениях под углом  $120^\circ$ )

The results of calculating the radial forces  $\sum F_2$  on the HC rods in the studied positions of the crank hydraulic motor of the SD HM LA (two HC located in the initial positions at an angle of  $120^\circ$ )

Положения кривошипного гидромотора Crank motor positions	Значения радиальных усилий $\sum F_2$ , кН Values of radial forces $\sum F_2$ , kN			Положения кривошипного гидромотора Crank motor positions	Значения радиальных усилий $\sum F_2$ , кН Values of radial forces $\sum F_2$ , kN		
	1 вариант 1 option	2 вариант 2 option	3 вариант 3 option		1 вариант 1 option	2 вариант 2 option	3 вариант 3 option
	1	-9,562	-9,562		0	9	20,494
2	55,08	-9,12	0	10	51,374	51,374	0
3	28,741	28,741	21,535	11	-20,958	-20,958	-20,958
4	-26,38	59,668	0	12	-64,619	7,337	0
5	31,378	31,378	0	13	-23,525	38,165	0
6	105,781	9,834	9,834	14	19,784	19,784	0
7	27,946	27,946	20,959	15	-21,554	-21,554	-21,554
8	-12,61	-12,61	0	16	-78,757	6,849	0

Примечание: для всех трех вариантов –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{вм} = 75,36$  кН; 1 вариант – задействованы в работе все полости ГЦ; 2 вариант – с выборочным отключением полостей; 3 вариант – с автоматическим изменением давления в полостях ГЦ

Note: for all three options –  $F_{vt} = 100.48$  kN,  $F_{vm} = 75.36$  kN; option 1 – all HC cavities are involved in the work; option 2 – with selective shutdown of cavities; option 3 – with automatic pressure change in the HC cavities

Источник: собственные вычисления авторов / Source: Authors' own calculations

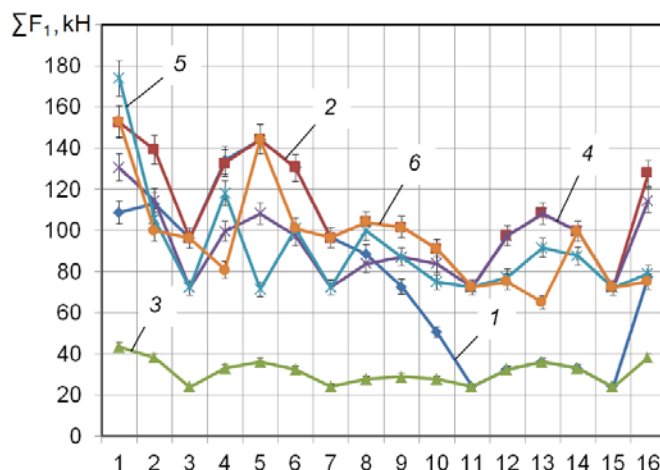


Рисунок 5. Кривые графика изменения касательных усилий, действующих на поворотную колонну ГМ с кривошипным гидромотором от двух ГЦ (угол между ними в начальном положении  $120^\circ$ ): 1 –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{вм} = 25,12$  кН; 2 –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{вм} = 75,36$  кН; 3 –  $F_{выд} = 25,12$  кН,  $F_{вм} = 25,12$  кН; 4 –  $F_{выд} = 75,36$  кН,  $F_{вм} = 75,36$  кН; 5 –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{вм} = 75,36$  кН (с автоматическим изменением давления в полостях ГЦ); 6 –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{вм} = 75,36$  кН (с отключением полостей ГЦ)

Figure 5. Curves of the graph of changes in tangential forces acting on the rotary column of the HM with a crank hydraulic motor from two HC (the angle between them in the initial position  $120^\circ$ ): 1 –  $F_{vt} = 100.48$  kN,  $F_{vm} = 25.12$  kN; 2 –  $F_{vt} = 100.48$  kN,  $F_{vm} = 75.36$  kN; 3 –  $F_{vt} = 25.12$  kN,  $F_{vm} = 25.12$  kN; 4 –  $F_{vt} = 75.36$  kN,  $F_{vm} = 75.36$  kN; 5 –  $F_{vt} = 100.48$  kN,  $F_{vm} = 75.36$  kN (with automatic pressure change in the HC cavities); 6 –  $F_{vt} = 100.48$  kN,  $F_{vm} = 75.36$  kN (with shutdown of HC cavities)

Источник: собственные вычисления авторов / Source: Authors' own calculations

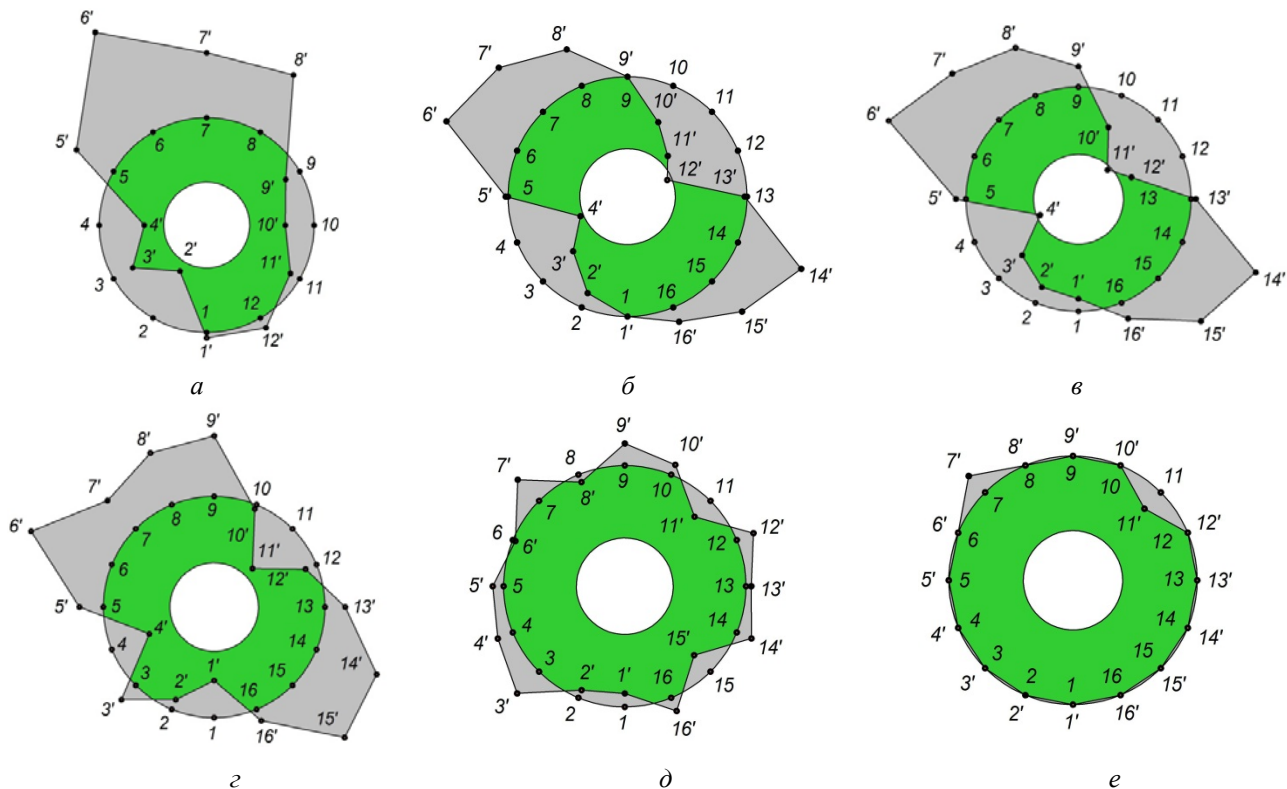


Рисунок 6. Диаграммы радиальных усилий, действующих на поворотную колонну ГМ с кривошипным гидромотором от двух ГЦ – а ( $60^\circ$  между ними в начальном положении) и от трех ГЦ б-е ( $120^\circ$  между ними в начальном положении): а –  $F_{\text{выд}} = 100,48$  кН,  $F_{\text{ем}} = 25,12$  кН; б –  $F_{\text{выд}} = 75,36$  кН,  $F_{\text{ем}} = 75,36$  кН; в –  $F_{\text{выд}} = 100,48$  кН,  $F_{\text{ем}} = 75,36$  кН; г –  $F_{\text{выд}} = 100,48$  кН,  $F_{\text{ем}} = 25,12$  кН; д –  $F_{\text{выд}} = 100,48$  кН,  $F_{\text{ем}} = 75,36$  кН (с выборочным отключением полостей ГЦ); е –  $F_{\text{выд}} = 100,48$  кН,  $F_{\text{ем}} = 75,36$  кН (с автоматическим изменением давления в полостях ГЦ)

Figure 6. Diagrams of radial forces acting on the HM rotary column with a crank hydraulic motor from two HC – a ( $60^\circ$  between them in the initial position) and from three HC b-e ( $120^\circ$  between them in the initial position): а –  $F_{\text{out}} = 100.48$  кН,  $F_{\text{vt}} = 25.12$  кН; б –  $F_{\text{out}} = 75.36$  кН,  $F_{\text{v}} = 75.36$  кН; в –  $F_{\text{vy}} = 100.48$  кН,  $F_{\text{v}} = 75.36$  кН; г –  $F_{\text{vy}} = 100.48$  кН,  $F_{\text{vt}} = 25.12$  кН; д –  $F_{\text{vy}} = 100.48$  кН,  $F_{\text{vt}} = 75.36$  кН (with selective shutdown of the HC cavities); е –  $F_{\text{vy}} = 100.48$  кН,  $F_{\text{vt}} = 75.36$  кН (with automatic pressure change in the HC cavities)

Источник: собственные схемы авторов  
Source: authors' own schemes

Работа кривошипного гидромотора ОПУ ГМ от двух ГЦ традиционным методом сопровождается значительными по величине радиальными усилиями, достигающими в пределах от  $-64,619$  до  $105,781$  кН (табл. 1), и, как следствие, наиболее интенсивным снижением долговечности подшипников такого гидромотора (рис. 4, в). Управление кривошипным гидромотором с выборочным отключением полостей ГЦ позволяет снизить значения радиальных усилий до пределов от  $-20,958$  до  $59,668$  кН (рис. 4, д). Минимальных значений радиальных усилий можно достичь путем управления на основе автоматического изменения давления рабочей жидкости в полостях ГЦ. Диапазон изме-

нения радиальных усилий в этом случае находится в интервале от  $-21,554$  до  $21,553$  кН (рис. 4, е). Установлено, что изменение касательных сил, действующих на поворотную колонну ГМ при традиционном методе управления находится в пределах от  $72,211$  до  $152,286$  кН, при выборочном отключении полостей ГЦ – от  $64,98$  до  $153,036$  кН, при автоматическом изменении давления рабочей жидкости – от  $71,394$  до  $174,045$  кН (рис. 5). Наибольшая равномерность касательных сил достигается при использовании управления кривошипным гидромотором на основе автоматического изменения давления рабочей жидкости в ГЦ.

Результаты расчета радиальных усилий  $\sum F_2$  на штоках ГЦ в исследуемых положениях кривошипного гидромотора ОПУ ГМ ЛА (три ГЦ, расположенных в начальном положении под углом  $120^\circ$ )

The results of calculating the radial forces  $\sum F_2$  on the HC rods in the studied positions of the crank hydraulic motor of the SD HM LA (three HC located in the initial position at an angle  $120^\circ$ )

Положения кривошипного гидромотора Crank motor positions	Значения радиальных усилий $\sum F_2$ , кН Values of radial forces $\sum F_2$ , kN			Положения кривошипного гидромотора Crank motor positions	Значения радиальных усилий $\sum F_2$ , кН Values of radial forces $\sum F_2$ , kN		
	1 вариант 1 option	2 вариант 2 option	3 вариант 3 option		1 вариант 1 option	2 вариант 2 option	3 вариант 3 option
	1	-12,562	-12,562		0	9	20,494
2	-16,82	-7,699	0	10	-34,453	9,97	-20,958
3	-32,851	28,741	0	11	-73,313	-20,958	0
4	-70,967	15,081	0	12	-55,181	16,774	0
5	10,032	10,032	0	13	4,936	4,935	0
6	93,268	-2,677	0	14	79,236	14,703	0
7	65,71	27,946	0	15	60,576	-21,567	0
8	51,757	-7,477	0	16	17,142	13,292	0

Примечание: для всех трех вариантов –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{ем} = 75,36$  кН; 1 вариант – задействованы в работе все полости ГЦ; 2 вариант – с выборочным отключением полостей; 3 вариант – с автоматическим изменением давления в полостях ГЦ

Note: for all three options –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_{vt} = 75.36$  kN; option 1 – all HC cavities are involved in the work; option 2 – with selective shutdown of cavities; option 3 – with automatic pressure change in the HC cavities

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

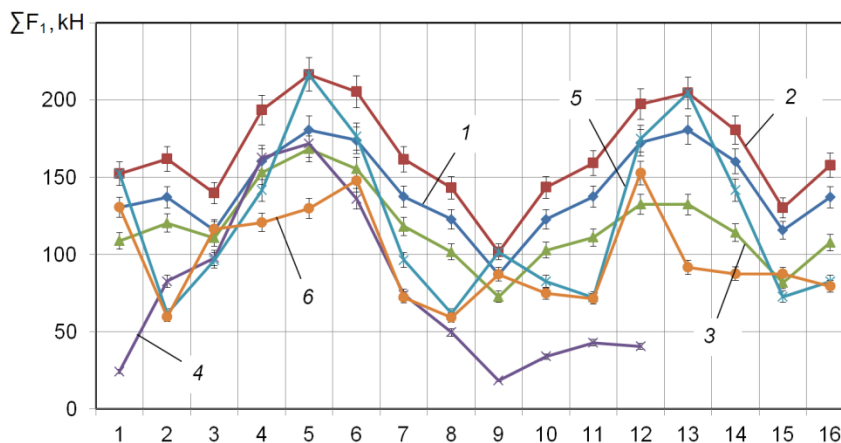


Рисунок 7. Кривые графика изменения касательных усилий, действующих на поворотную колонну ГМ с кривошипным гидромотором от двух ГЦ 4 (угол между ними в начальном положении  $60^\circ$ ), от трех ГЦ 1-3, 5, 6 (угол между ними в начальном положении  $120^\circ$ ): 1 –  $F_{выд} = 75,36$  кН,  $F_{ем} = 75,36$  кН; 2 –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{ем} = 75,36$  кН; 3 –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{ем} = 25,12$  кН; 4 –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{ем} = 25,12$  кН; 5 –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{ем} = 75,36$  кН (с автоматическим изменением давления в полостях ГЦ); 6 –  $F_{выд} = 100,48$  кН,  $F_{ем} = 75,36$  кН (с отключением полостей ГЦ)

Figure 7. Curves of the graph of changes in tangential forces acting on the rotary column of the HM with a crank hydraulic motor from two HC 4 (the angle between them in the initial position  $60^\circ$ ), from three HC 1-3, 5, 6 (the angle between them in the initial position  $120^\circ$ ): 1 –  $F_{vy} = 75, 36$  kN,  $F_v = 75.36$  kN; 2 –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_v = 75.36$  kN; 3 –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_v = 25.12$  kN; 4 –  $F_{vyd} = 100.48$  kN,  $F_v = 25.12$  kN; 5 –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_{vt} = 75.36$  kN (with automatic pressure change in the HC cavities); 6 –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_{vt} = 75.36$  kN (with shutdown of HC cavities)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

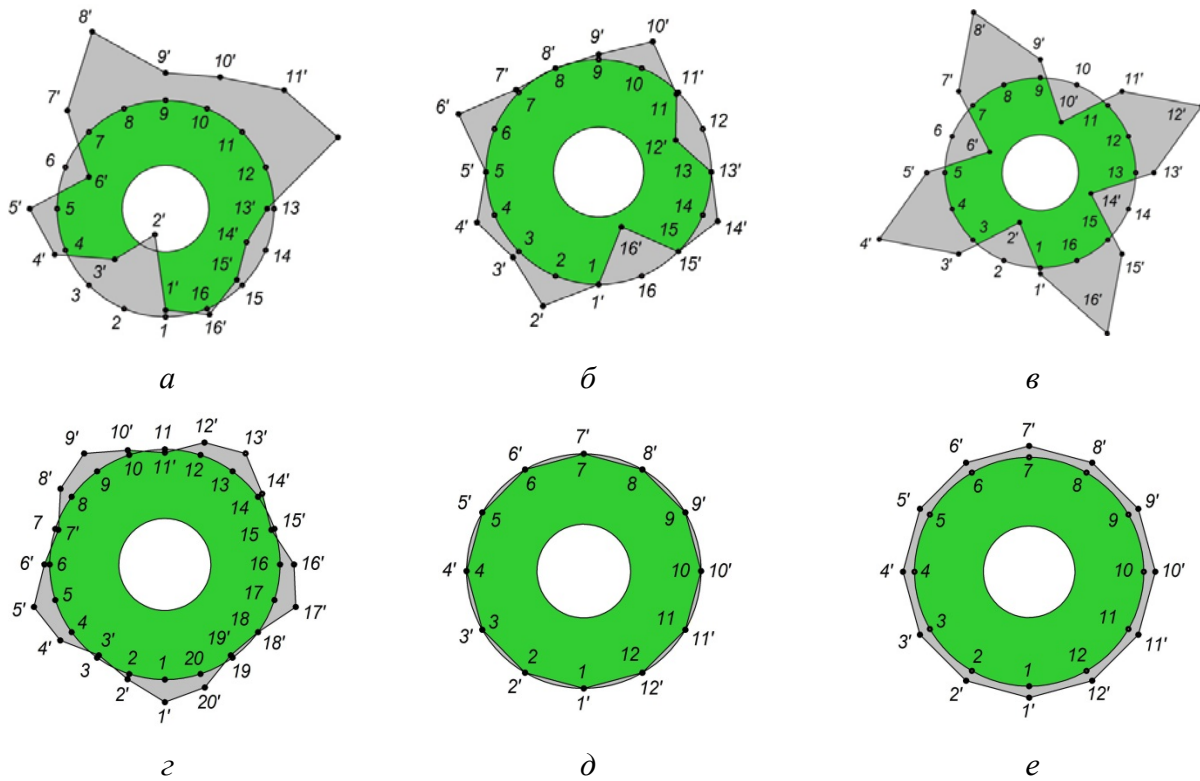


Рисунок 8. Диаграммы радиальных усилий, действующих на поворотную колонну ГМ с кривошипным гидромотором от двух ГЦ при различных углах между ними в начальном положении – *a* ( $90^0$ ), *b* (с изменяемым углом), от четырех ГЦ – *в* ( $90^0$ ), от пяти ГЦ – *г* ( $72^0$ ), от шести ГЦ – *д*, *е* ( $60^0$ ): *a* –  $F_{\text{выд}} = 100,48$  кН,  $F_{\text{ем}} = 25,12$  кН; *б* –  $F_{\text{выд}} = 100,48$  кН,  $F_{\text{ем}} = 75,36$  кН; *в* –  $F_{\text{выд}} = 100,48$  кН,  $F_{\text{ем}} = 25,12$  кН; *г* –  $F_{\text{выд}} = 100,48$  кН,  $F_{\text{ем}} = 75,36$  кН; *д* –  $F_{\text{выд}} = 75,36$  кН,  $F_{\text{ем}} = 75,36$  кН; *е* –  $F_{\text{выд}} = 100,48$  кН,  $F_{\text{ем}} = 75,36$  кН

Figure 8. Diagrams of radial forces acting on the HM rotary column with a crank hydraulic motor from two HC – *c* ( $90^0$  between them), *b* (with a variable angle), from four HC – *в* ( $90^0$  between them), from five HC – *г* ( $72^0$  between them), from six HC – *д*, *е* ( $60^0$  between them): *a* –  $F_{\text{vyd}} = 100.48$  kN,  $F_{\text{em}} = 25.12$  kN; *б* –  $F_{\text{vyd}} = 100.48$  kN,  $F_{\text{w}} = 75.36$  kN; *в* –  $F_{\text{vyd}} = 100.48$  kN,  $F_{\text{em}} = 25.12$  kN; *г* –  $F_{\text{vyd}} = 100.48$  kN,  $F_{\text{em}} = 75.36$  kN; *д* –  $F_{\text{vyd}} = 75.36$  kN,  $F_{\text{em}} = 75.36$  kN; *е* –  $F_{\text{vyd}} = 100.48$  kN,  $F_{\text{em}} = 75.36$  kN

Источник: собственные схемы авторов  
Source: authors' own schemes

Немного лучшие результаты наблюдаются при управлении кривошипным гидромотором ГМ от трех ГЦ (рис. 6). Диапазоны изменения радиальных усилий для трех рассматриваемых вариантов управления находятся от  $-78,757$  до  $105,781$  кН для первого, от  $-21,554$  до  $59,668$  кН для второго и от  $-21,554$  до  $21,535$  кН для третьего (табл. 2). Диапазоны изменения касательных усилий, соответственно находятся от  $101,722$  до  $216,524$  кН для первого варианта управления, от  $61,936$  до  $216,524$  кН для второго, от  $59,314$  до  $152,608$  кН для третьего варианта управления (рис. 7).

Выявлено, что из всех полученных круговых диаграмм исследуемых схем кривошипного гидро-

мотора, наилучшей равномерностью крутящего момента и воздействующих усилий на подшипники, в которых проворачивается колонна, обладают схемы с пятью (рис. 8, *г*) и шестью (рис. 8, *е*) ГЦ, управляемыми традиционным способом. Диапазоны изменения радиальных усилий для этих вариантов кривошипных гидромоторов составили соответственно от  $-3,32$  до  $22,07$  кН и от  $11,175$  до  $11,297$  кН (табл. 3). Диапазоны изменения касательных усилий – от  $257,893$  до  $285,274$  кН и от  $300,471$  до  $354,059$  кН (рис. 9).

#### Обсуждение

Анализ круговых диаграмм радиальных усилий, а также расчетных значений этих усилий, дей-

Результаты расчета радиальных усилий на штоках ГЦ в исследуемых положениях кривошипного гидромотора ОПУ ГМ ЛА

The results of calculating the radial forces on the HC rods in the studied positions of the crank hydraulic motor of the SD HM LA

Положения кривошипного гидромотора Crank motor positions	Значения радиальных усилий, кН Values of radial forces, kN			Положения кривошипного гидромотора Crank motor positions	Значения радиальных усилий, кН Values of radial forces, kN		
	1 вариант 1 option	2 вариант 2 option	3 вариант 3 option		1 вариант 1 option	2 вариант 2 option	3 вариант 3 option
1	0	22,07	11,22	11	-2,611	-3,320	11,297
2	32,628	5,414	11,175	12	-29,162	12,756	11,175
3	8,369	-2,827	11,216	13	0	21,593	-
4	19,028	13,789	11,295	14	16,171	4,98	-
5	0	21,903	11,216	15	-9,562	-3,125	-
6	38,885	5,161	11,295	16	-53,016	13,647	-
7	4,073	-3,152	11,216	17	-	21,886	-
8	0	13,425	11,295	18	-	5,294	-
9	5,029	21,586	11,216	19	-	-2,836	-
10	28,687	4,897	11,295	20	-	13,883	-

Примечание: для всех трех вариантов –  $F_{вход} = 100,48$  кН,  $F_{от} = 75,36$  кН; 1 вариант – 2 ГЦ и изменяемым углом; 2 вариант – 5 ГЦ (расположенных в начально положении под углом  $72^{\circ}$ ); 3 вариант – 6 ГЦ (расположенных в начально положении под углом  $60^{\circ}$ )

Note: for all three options –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_{vt} = 75.36$  kN; option 1 – 2 HC and variable angle; option 2 – 5 HC (located in the initial position at an angle  $72^{\circ}$ ); Option 3 – 6 HC (located in the initial position at an angle  $60^{\circ}$ )

Источник: собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

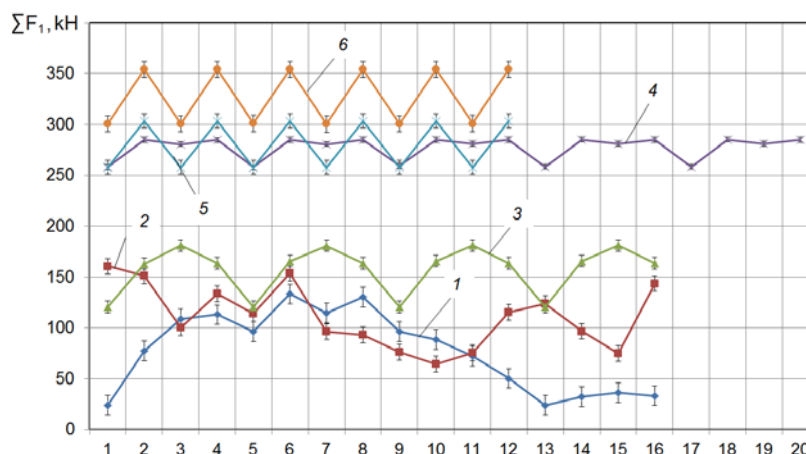


Рисунок 9. Графики изменения касательных усилий, действующих на поворотную колонну ГМ с кривошипным гидромотором при различных углах между ГЦ в начальном положении от двух ГЦ 1 ( $90^{\circ}$ ), от двух ГЦ 2 (с изменяющимся расстоянием), от четырех ГЦ 3 ( $90^{\circ}$ ), от пяти ГЦ 4 ( $72^{\circ}$ ), от шести ГЦ 5, 6 ( $60^{\circ}$ ): 1 –  $F_{вход} = 100,48$  кН,  $F_{от} = 25,12$  кН; 2 –  $F_{вход} = 100,48$  кН,  $F_{от} = 75,36$  кН; 3 –  $F_{вход} = 100,48$  кН,  $F_{от} = 25,12$  кН; 4 –  $F_{вход} = 100,48$  кН,  $F_{от} = 75,36$  кН; 5 –  $F_{вход} = 75,36$  кН,  $F_{от} = 75,36$  кН; 6 –  $F_{вход} = 100,48$  кН,  $F_{от} = 75,36$  кН

Figure 9. Graphs of changes in tangential forces acting on the HM rotary string with a crank hydraulic motor at different angles between the HC in the initial position from two HC 1 ( $90^{\circ}$ ), from two HC 2 (with varying distance), from four HC 3 ( $90^{\circ}$ ), from five HC 4 ( $72^{\circ}$ ), from six HC 5, 6 ( $60^{\circ}$ ): 1 –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_v = 25.12$  kN; 2 –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_v = 75.36$  kN; 3 –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_v = 25.12$  kN; 4 –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_v = 75.36$  kN; 5 –  $F_{vy} = 75.36$  kN,  $F_v = 75.36$  kN; 6 –  $F_{vy} = 100.48$  kN,  $F_v = 75.36$  kN

Источник: собственные вычисления авторов / Source: Authors' own calculations



вующих на подшипники, в которых проворачивается колонна ГМ, показывает, что от количества ГЦ в кривошипном гидромоторе, их расположения относительно друг друга, способа управления давлением в рабочих полостях ГЦ зависят величины растягивающих и сжимающих сил, динамических нагрузок, действующих на подшипники поворотной колонны ГМ, а также точность поворота колонны. Выявлено, что повышение давления рабочей жидкости в полостях ГЦ приводит к увеличению радиальных усилий, действующих на вал кривошипного гидромотора. Для повышения долговечности подшипников эти нагрузки не должны превышать предельно допустимых значений. Установлено, что

номинальное значение исследуемой касательной силы достигается не во всех исследуемых точках, а только в пределах определенного угла поворота кривошипного гидромотора. Превышение номинальных значений касательных сил, увеличивает величину крутящего момента.

Полученные результаты исследования позволили также предложить оптимальный вариант перспективной схемы кривошипного гидромотора для гидропривода ОПУ ГМ ЛА (рис. 10). Предлагаемая авторами конструкция гидропривода относится к реверсивным гидродвигателям и позволяет исключить большинство недостатков, присущих традиционным конструкциям ОПУ ГМ.

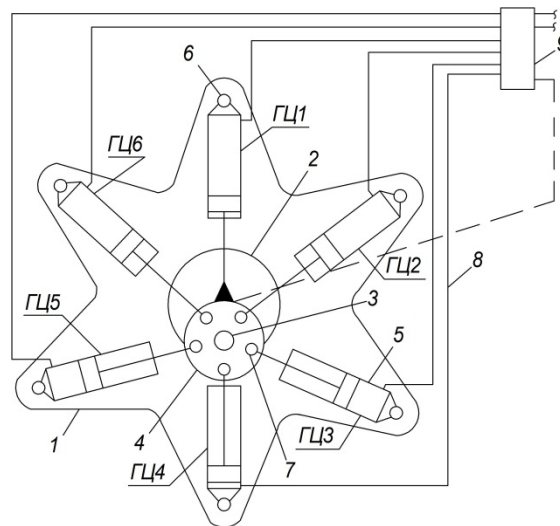


Рисунок 10. Кривошипный гидромотор ОПУ ГМ лесовозного автопоезда:

1 – корпус; 2 – вал; 3 – кривошип; 4 – диск; 5 – гидроцилиндр; 6, 7 – оси, неподвижная и подвижная; 8 – трубопровод; 9 – гидрораспределительное устройство

Figure 10. Crank hydraulic motor OPU GM of a timber road train: 1 – body; 2 – shaft; 3 – crank; 4 – disk; 5 – hydraulic cylinder; 6, 7 – axes, fixed and movable; 8 – pipeline; 9 – hydraulic distribution device

Источник: собственные схемы авторов

Source: authors' own schemes

### Заключение

Анализ научных работ отечественных и зарубежных ученых позволил установить, что значительное улучшение работы ГМ может быть достигнуто за счет: согласованного управления траекторией движения рабочего органа грейферного захвата с пачкой древесины, обеспечивающего повышение скорости его перемещения, сокращение времени на выполнение операций подъема, опускания и поворота, и, как следствие, снижение энергопо-

требления; повышения точности перемещений и позиционирования звеньев ГМ, обеспечения оптимальной полезной нагрузки, а также минимизации утечек в гидроприводе; улучшения энергоэффективности за счет оптимизации потерь потенциальной энергии в процессе работы гидропривода ГМ. Установлено, что одним из перспективных направлений, способствующих повышению эффективности механизмов поворота колонны на основе речных передач, является разработка и исследование

поворотных механизмов колонны с кривошипным гидромотором от различного числа ГЦ.

Приведена методика, описывающая последовательность построения круговых диаграмм на основе графоаналитического метода, учитывающего определение касательных и радиальных усилий, действующих на ОПУ ГМ с кривошипным гидромотором от заданного количества ГЦ.

Выявлено, что от количества ГЦ в кривошипном гидромоторе, их расположения относительно друг друга, от способа управления давлением в рабочих полостях ГЦ зависят величины растягивающих и сжимающих сил, ударных нагрузок, действующих на подшипники поворотной колонны ГМ, а также точность поворота колонны. Определено, что повышение давления рабочей жидкости в полостях ГЦ приводит к увеличению радиальных усилий, действующих на кривошипный гидромотор. Во избежание разрушения подшипников эти нагрузки не должны превышать предельно допустимых значений. Установлено, что номинальное значение исследуемой касательной силы достигается не во всех исследуемых точках, а только в пределах определенного угла поворота кривошипного гидромотора. Превышение номинальных значений касательных сил, увеличивает величину крутящего момента при повороте колонны ГМ.

Установлено, что наилучшим вариантом воздействующих усилий на подшипники, в которых

проворачивается колонна, обладают схемы с пятью и шестью ГЦ. Диапазоны изменения радиальных усилий для них составили соответственно от  $-3,32$  до  $22,07$  кН и от  $11,175$  до  $11,297$  кН, а касательных усилий – от  $257,893$  до  $285,274$  кН и от  $300,471$  до  $354,059$  кН.

Предложена перспективная схема кривошипного гидромотора ОПУ ГМ ЛА. Использование такого кривошипного гидромотора позволит повысить надежность за счет снижения динамических нагрузок при пуско- тормозных режимах работы, увеличить коэффициент полезного действия, улучшить равномерность угловой скорости поворота при различных значениях нагрузки, повысить точность позиционирования ГМ, даст возможность преобразовывать и накапливать при тормозных режимах работы ГМ энергию рабочей жидкости для последующего полезного использования с целью снижения энергозатрат на процесс погрузки и разгрузки лесоматериалов.

Полученные результаты исследования будут использованы при проектировании новых конструкций приводов для поворота колонн ГМ. Для практической реализации предлагаемой конструкции гидромотора планируется на основе методов математического моделирования осуществить рациональный выбор месторасположения ГЦ кривошипного гидромотора на раме ЛА.

### Список литературы

1. Компьютерное моделирование рекуперативного кривошипного механизма поворота колонны манипулятора лесовозного автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, В. А. Зеликов, П. В. Колодий // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 2(50). – С. 158-178. – *Библиогр.* : с. 174-177 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525090>
2. Анализ работы гидравлического манипулятора лесной машины с цикловой системой управления / Е. Н. Власов, А. В. Сергеевичев, Ю. А. Добрынин, В. В. Сергеевичев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – № 238. – С. 99-112. – *Библиогр.* : с. 109-110 (10 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.99-112>. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48186417>
3. Real-Time Anti-Saturation Flow Optimization Algorithm of the Redundant Hydraulic Manipulator / M. Cheng, L. Li, R. Ding, B. Xu // *Actuators* 2021, 10, 11, 19 p. – *Bibliogr.* : pp. 18-19 (28 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/act10010011>
4. Tran D-T. Adaptive Backstepping Sliding Mode Control Based RBFNN for a Hydraulic Manipulator Including Actuator Dynamics / D-T. Tran, H-V-A. Truong, K. K. Ahn // *Appl. Sci.* 2019, 9, 1265, 25 p. – *Bibliogr.* : pp. 24-25 (34 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app9061265>

5. Tele-Operated Bilateral Control of Hydraulic Manipulator Using a Robust Controller Based on the Sensorless Estimated Reaction Force / K. D. Kallu, S. J. Abbasi, H. Khan, J. Wang, M. C. Lee // *Appl. Sci.* 2019, 9, 1995, 23 p. – *Bibliogr.* : pp. 21-23 (45 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app9101995>
6. Adaptive Fuzzy Backstepping Sliding Mode Control for a 3-DOF Hydraulic Manipulator with Nonlinear Disturbance Observer for Large Payload Variation / H. V. A. Truong, D. T. Tran, X. D. To, K. K. Ahn, M. Jin // *Appl. Sci.* 2019, 9, 3290, 29 p. – *Bibliogr.* : pp. 27-29 (52 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163290>
7. Truong H. V. A. Safety Operation of n-DOF Serial Hydraulic Manipulator in Constrained Motion with Consideration of Contact-Loss Fault / H. V. A. Truong, H. A. Trinh, K. K. Ahn // *Appl. Sci.* 2020, 10, 8107, 22 p. – *Bibliogr.* : pp. 19-22 (51 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app10228107>
8. Learning from Demonstration for Hydraulic Manipulators / M. Suomalainen, J. Koivumaki, S. Lampinen, V. Kyrki, J. Mattila // 2018 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018, pp. 3579-3586. – *Bibliogr.* : pp. 3586 (34 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594285>
9. A Teleoperation Framework Based on Heterogeneous Matching for Hydraulic Manipulator / S. Zhou, C. Shen, S. Zhu, W. Li, Y. Nie, Z. Chen // *Machines* 2022, 10, 536, 15 p. – *Bibliogr.* : pp. 14-15 (30 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10070536>
10. Nurmi J. Global Energy-Optimal Redundancy Resolution of Hydraulic Manipulators : Experimental Results for a Forestry Manipulator / J. Nurmi, J. Mattila // *Energies* 2017, 10(5), 647. – *Bibliogr.* : pp. 30-31 (44 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en10050647>
11. Zhou H. A practical method for the deformation of long-stroke hydraulic manipulators in grasping-handling tasks / H. Zhou, X. Zhang, J. Liu // *J Field Robotics.* 2023, pp. 1-17. – *Bibliogr.* : pp. 16-117 (35 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.22160>
12. Adaptive Dynamic Programming-Based Cross-Scale Control of a Hydraulic-Driven Flexible Robotic Manipulator / X. Wei, J. Ye, J. Xu, Z. Tang // *Appl. Sci.* 2023, 13, 2890, 27 p. – *Bibliogr.* : pp. 25-27 (37 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13052890>
13. Autonomous Control of Redundant Hydraulic Manipulator Using Reinforcement Learning with Action Feedback / R. Dhakate, C. Brommer, C. Bohm, H. Gietler, S. Weiss, J. Steinbrener // 2022 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Kyoto, Japan, 2022, pp. 7036-7043. – *Bibliogr.* : pp. 7043 (20 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981425>
14. Kim M. Real-Time Simulator of a Six Degree-of-Freedom Hydraulic Manipulator for Pipe-Cutting Applications / M. Kim, S.-U. Lee, S.-S. Kim // *IEEE Access*, vol. 9, pp. 153371-153381, 2021, 11 p. – *Bibliogr.* : pp. 10-11 (32 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3127502>
15. P. Li Research on the electro-hydraulic servo system of picking manipulator / P. Li, Y. Li // *AIP Advances* 13, 015312 (2023), 13 p. – *Bibliogr.* : pp. 13 (20 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0130344>
16. Oscillating method for monitoring the technical condition of the hydraulic cylinders of manipulator machines / A. I. Pavlov, A. A. Tarbeev, A. V. Egorov, I. A. Polyaniin, S. Ya. Alibekov, A. V. Lysyannikov, Yu. F. Kaizer, T. Y. Matkerimov // *Journal of Physics : Conference Series* 1515 042053 (2020). – 7 p. – *Bibliogr.* : pp. 6-7 (20 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042053>
17. Energy efficiency improvement of heavy-load mobile hydraulic manipulator with electronically tunable operating modes / R. Ding, J. Zhang, B. Xub, M. Cheng, M. Pan // *Energy Conversion and Management* 188 (2019), pp. 447-461. – *Bibliogr.* : pp. 460-461 (31 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.023>
18. Перспективная конструкция полноповоротного механизма колонны гидравлического манипулятора лесовозного автомобиля / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, А. А. Михайлов // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции Современный лесной комплекс страны : проблемы и тренды развития ; отв. редактор А. А. Платонов. – Воронеж, 2022. – С. 57-61. – Библиогр.: с. 60-61 (6 назв.).* – DOI: [http://doi.org/10.58168/MFCCPTD2022\\_57-61](http://doi.org/10.58168/MFCCPTD2022_57-61). – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49911437>



19. О перспективности использования гидроцилиндров в поворотном механизме колонны гидравлического манипулятора лесовозного автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. А. Михайлов, И. О. Храпов // Инновации в автомобильном транспорте : материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 19-20 мая 2022 года. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 4-9. – Библиогр. : с. 9 (7 назв.). – DOI: [http://doi.org/10.34220/IRT2022\\_4-9](http://doi.org/10.34220/IRT2022_4-9). – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48696631>

20. Посметьев, В. И. О влиянии традиционных конструкций гидроманипуляторов на эффективность лесовозного автомобильного транспорта / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий и научно-технических решений», 2022. – С. 24-31. – Библиогр. : с. 30-31 (9 назв.). – DOI: [http://doi.org/10.58168/PRTOW2022\\_24-31](http://doi.org/10.58168/PRTOW2022_24-31). – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49783991>

### References

1. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Zelikov V. A., Kolodii P. V. *Kompyuternoe modelirovanie rekuperativnogo krivoshipnogo mehanizma povorota kolonni manipulyatora lesovoznogo avtopoezda* [Computer modeling of a regenerative crank mechanism for turning the column of the manipulator of a timber road train]. *Forestry journal*. – 2023. – Vol. 13, № 2(50). – P. 158-178. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9> (In Russ.).

2. Vlasov E. N., Sergeevichev A. V., Dobrinin Yu. A., Sergeevichev V. V. *Analiz raboti gidravlicheskogo manipulyatora lesnoi mashini s ciklovoi sistemoi upravleniya* [Analysis of the operation of a hydraulic manipulator of a forestry machine with a cyclic control system]. *News of the St. Petersburg Forestry Academy*. – 2022. – № 238. – P. 99-112. DOI: <http://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.99-112> (In Russ.).

3. Cheng M., Li L., Ding R., Xu B. Real-Time Anti-Saturation Flow Optimization Algorithm of the Redundant Hydraulic Manipulator. *Actuators* 2021, 10, 11, 19 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/act10010011>

4. Tran D.-T., Truong H.-V.-A., Ahn K. K. Adaptive Back stepping Sliding Mode Control Based RBFNN for a Hydraulic Manipulator Including Actuator Dynamics. *Appl. Sci.* 2019, 9, 1265, 25 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9061265>

5. Kallu K. D., Abbasi S. J., Khan H., Wang J., Lee M. C. Tele-Operated Bilateral Control of Hydraulic Manipulator Using a Robust Controller Based on the Sensorless Estimated Reaction Force. *Appl. Sci.* 2019, 9, 1995, 23 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9101995>

6. Truong H. V. A., Tran D. T., To X. D., Ahn K. K., Jin M. Adaptive Fuzzy Backstepping Sliding Mode Control for a 3-DOF Hydraulic Manipulator with Nonlinear Disturbance Observer for Large Payload Variation. *Appl. Sci.* 2019, 9, 3290, 29 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163290>

7. Truong H. V. A., Trinh H. A., Ahn K. K. Truong Safety Operation of n-DOF Serial Hydraulic Manipulator in Constrained Motion with Consideration of Contact-Loss Fault. *Appl. Sci.* 2020, 10, 8107, 22 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10228107>

8. Suomalainen M., Koivumaki J., Lampinen S., Kyrki V., Mattila J. Learning from Demonstration for Hydraulic Manipulators. 2018 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain, 2018, pp. 3579-3586. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594285>

9. Zhou S., Shen C., Zhu S., Li W., Nie Y., Chen Z. A Teleoperation Framework Based on Heterogeneous Matching for Hydraulic Manipulator. *Machines* 2022, 10, 536, 15 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10070536>

10. Nurmi J., Mattila J. Global Energy-Optimal Redundancy Resolution of Hydraulic Manipulators : Experimental Results for a Forestry Manipulator. *Energies* 2017, 10(5), 647. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10050647>

11. Zhou H., Zhang X., Liu J. A practical method for the deformation of long-stroke hydraulic manipulators in grasping-handling tasks. *J Field Robotics*. 2023, pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.22160>

12. Wei X., Ye J., Xu J., Tang Z. Adaptive Dynamic Programming-Based Cross-Scale Control of a Hydraulic-Driven Flexible Robotic Manipulator. *Appl. Sci.* 2023, 13, 2890, 27 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13052890>

13. Dhakate R., Brommer C., Bohm C., Gietler H., Weiss S., Steinbrener J. Autonomous Control of Redundant Hydraulic Manipulator Using Reinforcement Learning with Action Feedback. 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Kyoto, Japan, 2022, pp. 7036-7043. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981425>
14. Kim M., Lee S.-U., Kim S.-S. Real-Time Simulator of a Six Degree-of-Freedom Hydraulic Manipulator for Pipe-Cutting Applications. IEEE Access, vol. 9, pp. 153371-153381, 2021, 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3127502>
15. Li P., Li Y. Research on the electro-hydraulic servo system of picking manipulator. AIP Advances 13, 015312 (2023), 13 p. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0130344>
16. Pavlov A. I., Tarbeev A. A., Egorov A. V., Polyaniy I. A., Alibekov S. Ya., Lysyannikov A. V., Kaizer Yu. F., Matkerimov T. Y. Oscillating method for monitoring the technical condition of the hydraulic cylinders of manipulator machines. Journal of Physics : Conference Series 1515 042053 (2020). – 7 p. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042053>
17. Ding R., Zhang J., Xub B., Cheng M., Pan M. Energy efficiency improvement of heavy-load mobile hydraulic manipulator with electronically tunable operating modes. Energy Conversion and Management 188 (2019) pp. 447-461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.023>
18. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Mihailov A. A. *Perspektivnaya konstrukciya polnopovorotnogo mehanizma kolonni gidravlicheskogo manipulyatora lesovoznogo avtomobilya* [Perspective design of the full-rotation mechanism of the column of the hydraulic manipulator of a timber vehicle]. Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference Modern forest complex of the country : problems and development trends. Rep. editor A. A. Platonov. Voronezh, 2022. – P. 57-61. DOI: [http://doi.org/10.58168/MFCCPTD2022\\_57-61](http://doi.org/10.58168/MFCCPTD2022_57-61) (In Russ.).
19. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Mihailov A. A., Hrapov I. O. *O perspektivnosti ispolzovaniya gidrocilindrov v povorotnom mehanizme kolonni gidravlicheskogo manipulyatora lesovoznogo avtopoezda* [On the prospects of using hydraulic cylinders in the rotary mechanism of the column of a hydraulic manipulator of a timber road train]. Innovations in road transport : materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, May 19-20, 2022. – Voronezh : Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozova, 2022. – S. 4-9. DOI: [http://doi.org/10.34220/IRT2022\\_4-9](http://doi.org/10.34220/IRT2022_4-9) (In Russ.).
20. Posmetev V. I., Nikonov V. O. *O vliyaniy traditsionnykh konstruktsiy gidromanipulyatorov na effektivnost lesovoznogo avtomobilnogo transporta* [On the influence of traditional designs of hydraulic manipulators on the efficiency of logging road transport]. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of the operation of road transport and ways to solve them based on advanced technologies and scientific and technical solutions", 2022. – P. 24-31. DOI: [http://doi.org/10.58168/PRTOW2022\\_24-31](http://doi.org/10.58168/PRTOW2022_24-31) (In Russ.).

### 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).

✉ 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](mailto:8888nike8888@mail.ru).

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, 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: [victorvp@mail.ru](mailto:victorvp@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](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

*Попиков Петр Иванович* – доктор технических наук, профессор, профессор 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: <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru).

*Колодий Петр Владимирович* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесохозяйственных дисциплин Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, ул. Мазурова – 59/34, г. Гомель, Республика Беларусь, 246053, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6418-1531>, e-mail: [pkolody@mail.ru](mailto:pkolody@mail.ru).

*Михайлов Александр Александрович* – преподаватель филиала ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», ул. Урицкого, д. 75 а, г. Воронеж, Российская Федерация, 394026, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1575-4013>, e-mail: [mikhaylov\\_a.a@mail.ru](mailto:mikhaylov_a.a@mail.ru).

### Information about the authors

*Posmetev Valerii Ivanovich* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru).

✉ *Nikonov Vadim Olegovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: [8888nike8888@mail.ru](mailto:8888nike8888@mail.ru).

*Posmetev Viktor Valerevich* – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, st. Timiryazeva, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: [victorvpo@mail.ru](mailto:victorvpo@mail.ru).

*Zelikov Vladimir Anatolyevich* – 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](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

*Popikov Petr Ivanovich* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>; e-mail: [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru).

*Kolodiy Petr Vladimirovich* – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Disciplines, Gomel State University named after F. Skorina, st. Mazurova – 59/34, Gomel, Republic of Belarus, 246053, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6418-1531>, e-mail: [pkolody@mail.ru](mailto:pkolody@mail.ru).

*Mikhailov Aleksandr Aleksandrovich* – teacher of the branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Rostov State Transport University", st. Uritskogo, 75 a, Voronezh, Russian Federation, 394026, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1575-4013>, e-mail: [mikhaylov\\_a.a@mail.ru](mailto:mikhaylov_a.a@mail.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author

Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14>

УДК 631.356.46



## Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere»

Владимир В. Сиваков<sup>1</sup>, sv@bgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Анатолий Н. Заикин<sup>1</sup>, zaikin.anatolij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

Татьяна П. Новикова<sup>2</sup>, novikova\_tp.vglta@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Владимир А. Зеликов<sup>2</sup>✉, zelikov-vrn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Владимир В. Стасюк<sup>2</sup>✉, stasiuk.volodya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8689-955X>

Алексей С. Чуйков<sup>3</sup>, offlex88@belstu.by, <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, 241037, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

<sup>3</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

При организации работы лесосозаготовительных машин следует учитывать не только их технические характеристики, но и адаптацию в единое цифровое пространство. При отсутствии синхронизации снижается возможность контролировать объемы заготовленной древесины, оптимизировать сортиментные планы для получения максимальной выгоды, осуществлять удаленный мониторинг технического состояния машин, организовывать их эффективное техническое обслуживание и ремонт. Программное обеспечение, используемое производителями лесозаготовительной техники «Ponsse», «Komatsu», «John Deere», оценивали по четырнадцати критериям контроля параметров, управления техническим обслуживанием машин, обучения персонала с помощью метода межгрупповых связей (мера Жаккара), и визуализировали кластерной диаграммой. Основой цифровых систем является программные решения, позволяющие интегрировать в единое информационное пространство компании машины только одного бренда, что сужает поле их деятельности, а следовательно, снижает эффективность их применения. В существующих моделях цифровых экосистем рассмотренных компаний не хватает модуля, связанного с планированием лесозаготовок, что не позволяет эффективно увязать потребное количество техники (харвестеров, форвардеров, погрузчиков, трелевщиков) с планируемыми объемами заготовки древесины, а также согласовать их работу и производительность с техническим обслуживанием и ремонтом. Несбалансированность объемов выработки разными машинами, применяемыми на лесозаготовках, ведет к простоям наиболее производительных (головных) машин и снижению общего объема их выработки до минимального на одной из основных операций.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, «Ponsse», «Komatsu», «John Deere», лесной комплекс, лесовосстановительные работы, лесозаготовки, информационное пространство.

**Финансирование:** исследование проведено при поддержке локального гранта ФГБОУ ВО ВГЛТУ.

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

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


**Для цитирования:** Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» / В. В. Сиваков, А. Н. Заикин, Т. П. Новикова, В. А. Зеликов, В. В. Стасюк, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 200–218. – Библиогр.: с. 211–217 (50 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14>.


*Поступила* 02.10.2023. *Пересмотрена* 03.11.2023. *Принята* 13.11.2023. *Опубликована онлайн* 30.11.2023.



Review



### Digitalization of the workflow management system of logging machines: efficiency assessment using the example of «Ponsse», «Komatsu», and «John Deere»


Vladimir V. Sivakov<sup>1</sup>, [sv@bgitu.ru](mailto:sv@bgitu.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Anatolii N. Zaikin<sup>1</sup>, [zaikin.anatolij@yandex.ru](mailto:zaikin.anatolij@yandex.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

Tatyana P. Novikova<sup>2</sup>, [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Vladimir A. Zelikov<sup>2</sup> , [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Vladimir V. Stasyuk<sup>2</sup> , [stasiuk.volodya@yandex.ru](mailto:stasiuk.volodya@yandex.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-8689-955X>

Alexey S. Chuikov<sup>3</sup>, [offlex88@belstu.by](mailto:offlex88@belstu.by),  <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

<sup>1</sup> Bryansk State Technological University of Engineering, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation

<sup>2</sup> Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva street, Voronezh, 394087, Russian Federation

<sup>3</sup> Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus

#### Abstract

When organizing the work of logging machines, it is necessary to take into account not only their technical characteristics, but also their adaptation into a single digital space. In the absence of synchronization, the ability to control the volume of harvested wood, optimize sorting plans for maximum benefit, remotely monitor the technical condition of the tires, organize their effective maintenance and repair is reduced. The software used by the manufacturers of logging equipment "Ponsse", "Komatsu", "John Deere" was evaluated according to fourteen criteria for parameter control, machine maintenance management, personnel training using the method of intergroup relations (Jacquard measure), and visualized with a cluster diagram. The basis of digital systems is software solutions that allow integrating machines of only one brand into a single information space of the company, which narrows the field of their activity, and therefore reduces the effectiveness of their application. The existing models of digital ecosystems of the companies under consideration lack a module related to logging planning, which does not allow to effectively link the required amount of equipment (harvesters, forwarders, loaders, skidders) with the planned volumes of timber harvesting, as well as to coordinate their work and productivity with maintenance and repair. The imbalance of output volumes by different machines used in logging leads to downtime of the most productive (head) machines and a decrease in the total volume of their output to a minimum at one of the main operations.

**Keywords:** *software, "Ponsse", "Komatsu", "John Deere", forest complex, reforestation, logging, information space.*

**Funding:** the study was conducted with the support of a VSUFT local grant.

**Acknowledgments:** software, forest complex, reforestation, logging, information space.

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

**For citation:** Sivakov V. V., Zaikin A. N., Novikova T. P., Zelikov V. A., Stasyuk V. V., Chuikov A. S. (2023). Digitalization of the workflow management system of logging machines: efficiency assessment using the example of «Ponsse», «Komatsu», and «John Deere». *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 200-218 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14>.

**Received** 02.10.2023. **Revised** 03.11.2023. **Accepted** 13.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

## Введение

Широкое внедрение цифровых технологий [1] во все сферы хозяйственной деятельности является одним из основных трендов последнего времени [2], их основой является применение интернета вещей [3] и цифровых двойников изделий и процессов [4, 5, 6]. В России также наметился устойчивый тренд на внедрение цифровых технологий в разных областях, в том числе и в лесном комплексе [7]. При выборе машин для лесозаготовок [8, 9] (харвестеров, форвардеров, погрузчиков, сортиментовозов и других лесозаготовительных машин) важно учитывать не только их технические характеристики [38], но и то, насколько быстро и эффективно они могут быть адаптированы в единое цифровое пространство, позволяющее осуществлять планирование лесозаготовительных [10, 11] и лесовосстановительных [37,39] работ, удаленный контроль технического состояния узлов и агрегатов [12, 13] лесозаготовительных машин, их объемы выработки [14, 15], а также управление техническим обслуживанием и ремонтом [16,40] лесозаготовительных машин, включая распределение работ между персоналом [31;32;43] и логистику запасных частей [50].

В основе цифровизации харвестеров, форвардеров, скиддеров, сортиментовозов [48] и других лесозаготовительных машин как технических систем [35,42,44] лежит электронная компонентная база [33-36] и средства ее разработки [45-47]. Программное обеспечение в этой области активно развивается, появляется большое количество информационных систем [17, 18, 41], позволяющих интегрировать все данные в единое цифровое пространство. Основой цифровизации являются цифровые карты [19, 20]. Использование сложных лесных машин привело к необходимости повышения эффективности обучения операторов путем примене-

ния электронных тренажеров [21], технологий дополненной и виртуальной реальностей [22], электронных симуляторов [23]. Программное обеспечение в области лесного хозяйства и лесозаготовок разрабатывается как коммерческими компаниями, так и вузовскими коллективами [24].

Рассмотрим вопросы цифровизации системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин на примере основных производителей лесозаготовительной техники, таких, как «Ponsse», «Komatsu», «John Deere» [24].

В качестве цели исследований установлена оценка применимости программного обеспечения для цифровизации лесозаготовительных машин трех указанных производителей по критериям эффективности обеспечения единого цифрового пространства.

## Материалы и методы

### Объект исследования

Коммерческое программное обеспечение, применяемое ведущими зарубежными производителями лесозаготовительной техники «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere».

### Сбор данных

Сбор данных основан на систематическом поиске по базам данных ELibrary.ru и открытым ресурсам сети интернет (например, LENS, Google Scholar) при следующем дескрипторе запроса: {информационные системы производителей лесозаготовительной техники}. Диапазон поиска – 2013-2023 годы.

### Анализ данных

По аналогии с ранее проведенными исследованиями, «из систематического поиска были отобраны наиболее часто применяемые программные продукты и оценена в программном обеспечении для статистических вычислений SPSS Statistics v25 степень их сходства и различия [7,18]» по следую-

щим бинарным (0 – отсутствие; 1 – наличие) критериям: возможности управления лесозаготовительной техникой, возможности использования цифровых карт, возможностью мониторинга параметров лесозаготовительных машин, возможностью контроля парка машин, возможностью управления техническим обслуживанием, возможностью удаленного доступа, мониторинга лесозаготовок, планирования лесозаготовок, возможностью управления со смартфона и возможностью обучения персонала (симуляторов).

Визуализацию оценочных данных, согласно А.Н. Заикину и соавторам (2023), осуществляли

кластерной [49] «диаграммой (рис. 1), по оси абсцисс которой откладывали меру Жаккара (Jaccard) для бинарных данных, вычисленную по методу межгрупповой связи, а по оси ординат – критерии оценки [18]».

### Результаты

Сравнительные характеристики цифровых сервисов производителей лесозаготовительной техники «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные характеристики цифровых сервисов техники «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere»

Table 1

Comparative characteristics of digital services of the «Ponsse», «Komatsu» and «John Deere» logging equipment

Наименование   Name	«Ponsse»	«Komatsu»	«John Deere»
Управление техникой   Equipment management:			
- харвестеры   - harvesters	1	1	1
- форвардеры   - forwarders	1	1	1
- другая техника   - other equipment	0	0	1
Цифровые карты + GIS   Digital maps + GIS	1	1	1
Мониторинг параметров машин   Monitoring of machine parameters	1	0	1
Контроль парка машин   Fleet control	1	1	1
Управление техническим обслуживанием   Maintenance management			
- харвестеры   - harvesters	1	1	1
- форвардеры   - forwarders	1	1	1
- другая техника   - other equipment	0	0	1
Удаленный доступ   Remote access	1	0	1
Мониторинг лесозаготовок   Logging monitoring	1	0	0
Планирование лесозаготовок   Logging planning	0	0	0
Мобильная версия   Mobile version	1	0	1
Обучающие симуляторы   Educational simulators	0	0	1

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Кластерная диаграмм, построенная на основании табл. 1, представлена на рис. 1.

Основой цифровой системы «Ponsse» (рис. 2) является программное решение Ponsse Manager, позволяющее интегрировать в единое информационное пространство компании машины бренда и управлять всем парком для достижения наилучших финансовых показателей.

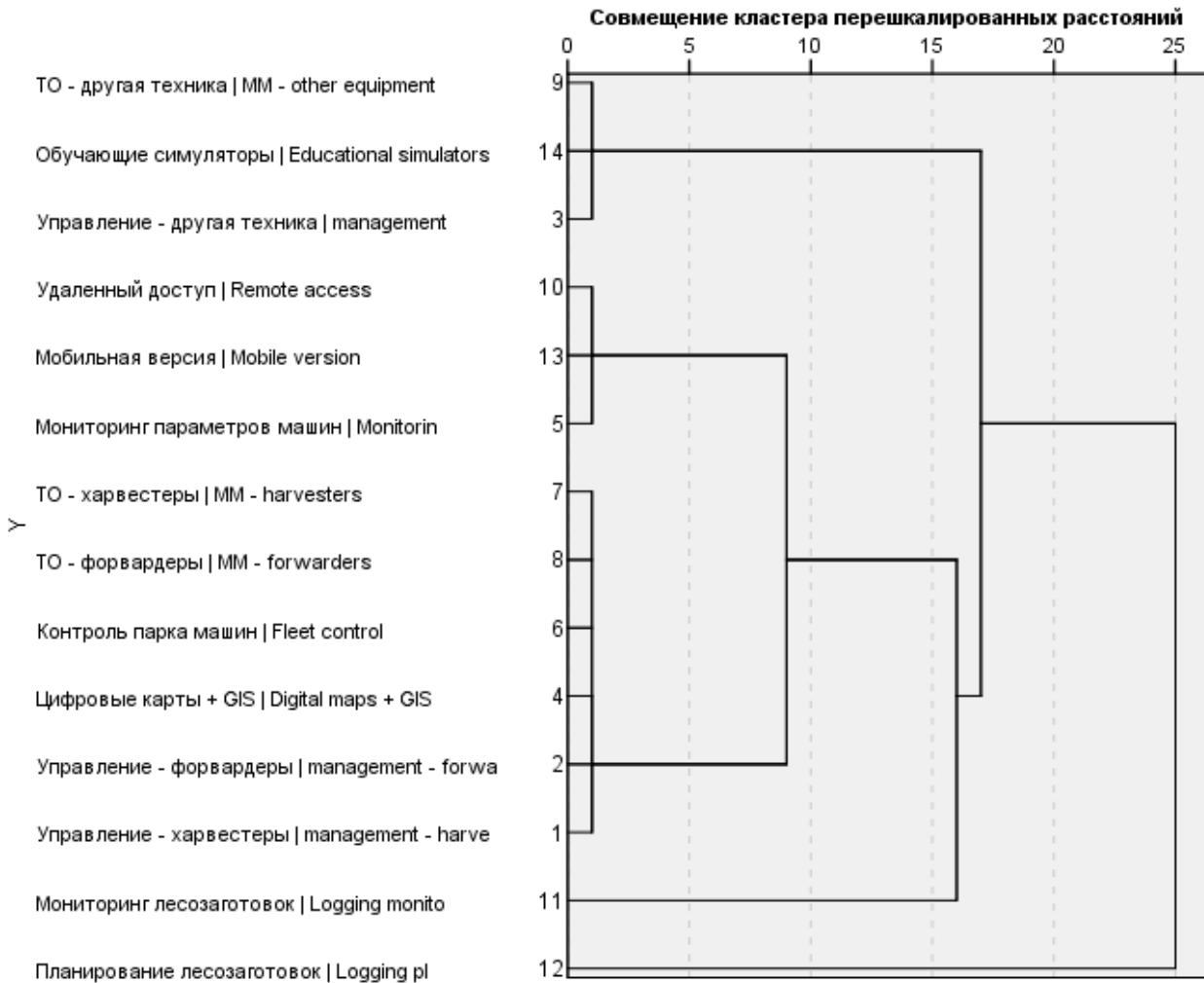
С целью осуществления процесса планиро-

вания и контроля лесозаготовок компанией разработан ряд продуктов линейки Opti, позволяющего планировать проведение лесозаготовок, отправлять карты местности на лесозаготовительную машину, оценивать количество заготовленной древесины, в том числе по регионам.

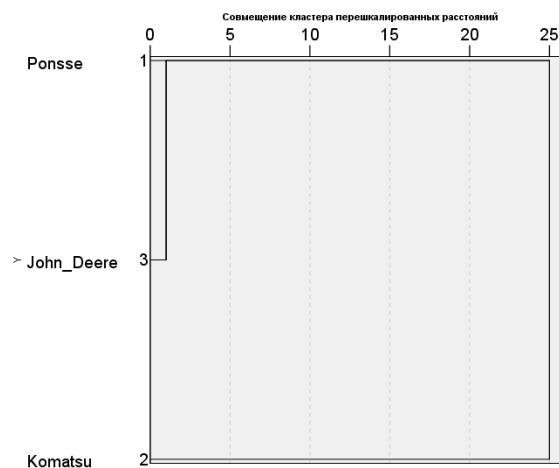
Управление работой лесозаготовительной техники осуществляется специальным программным обеспечением:

- Opti 5G (харвестеры);  
- Opti Control, Opti Eco Drive (форвардеры);

- Opti 7 PC (лесозаготовительные машины на гусеничном ходу).



*a | a*



*б | b*

Рисунок 1. Кластерная диаграмма сходства и различия для оценки применимости цифровых сервисов лесозаготовительной техники «Ponsse», «Komatsu» и «John Deere» по критериям эффективности (а) и производителю (б)

Figure 1. Diagram of similarities and differences for assessing the applicability of «Ponsse», «Komatsu», and «John Deere» logging machinery according to the performance criteria (a) and the manufacturer (b)

Источник: собственные результаты авторов  
Source: own results



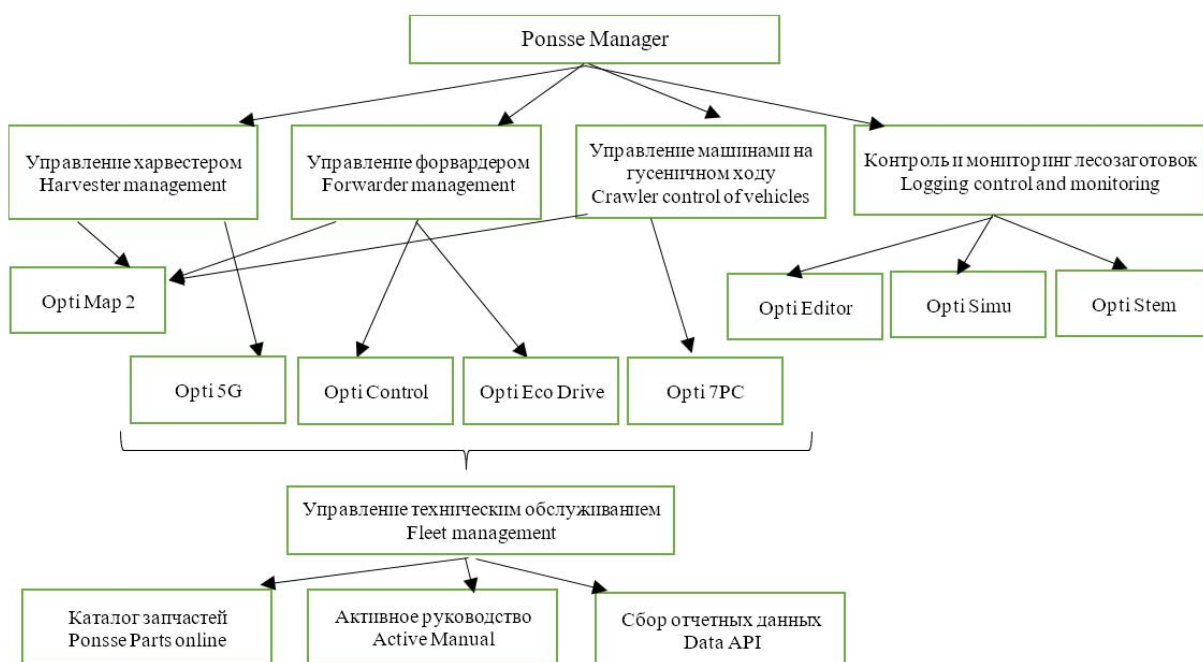


Рисунок 2. Программное обеспечение для управления парком машин PONSSE

Figure 2. PONSSE fleet management

Источник: Собственная схема авторов

Source: Authors' own scheme

Все системы используют цифровые карты Opti Map 2. Основой для объединения всех указанных систем является программа PONSSE Manager, контролирующая все операции компании, парк рабочих машин с целью роста эффективности планирования работ по поддержанию технического состояния и отчетности по фактически отработанному времени. Программой можно пользоваться на смартфоне или планшете.

Цифровизация управления техническим обслуживанием и ремонтом машин осуществляется на основе программы Fleet Management (рис. 3).

PONSSE Active Manual (рис. 4) обеспечивает доступ к активному руководству по использованию машинами, правильным приемам технического обслуживания, позволяя получение нужной информации в любое время.

PONSSE Parts Online (рис. 5) дает возможность получать информацию о ценах и наличии запчастей круглосуточно в режиме реального времени, является частью сервиса PONSSE Manager, доступен по адресу <https://ponssemanager.com>.

PONSSE Data API является инновационным интерфейсом, который предоставляет актуальные и точные данные о парке лесной техники для целей отчетности, контроля и планирования ресурсов. Данные, собранные с отдельных лесных машин, обрабатываются в облачной среде и далее предоставляются ИТ-системам заказчика. На основе этих данных создаются различные отчеты, позволяющие эффективно планировать ресурсы и соответствующим образом планировать предстоящую работу, что позволяет значительно повысить эффективность работы [25].

Цифровой основой программного обеспечения управления машинами компании «Komatsu» (рис. 6) служит программный продукт MaxiExplorer (рис. 7), представляющий собой комплексную систему управления машиной, агрегатом, процессом раскрывки, установками манипулятора, имеет ряд функций административного назначения, обеспечивающих контроль над цепочкой логистических и производственных процессов.

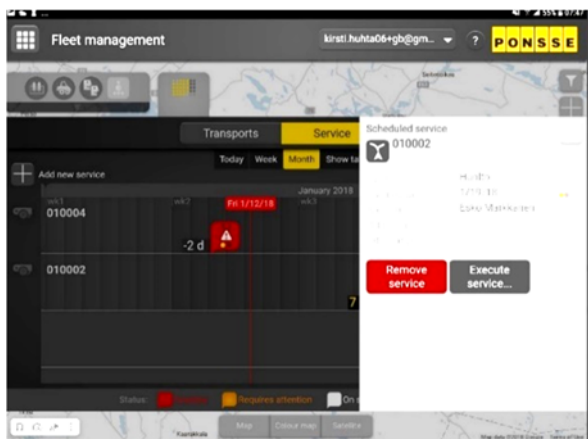


Рисунок 3. Интерфейс программы Fleet Management  
 Источник: Собственная схема авторов  
 Figure 2. Fleet Management Program Interface  
 Source: Authors' own scheme

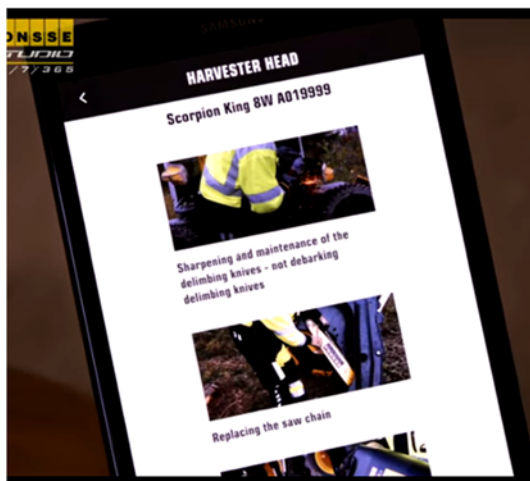


Рисунок 4. Интерфейс Active Manual  
 Источник: Собственная схема авторов  
 Figure 4. Active Manual Interface  
 Source: Authors' own scheme

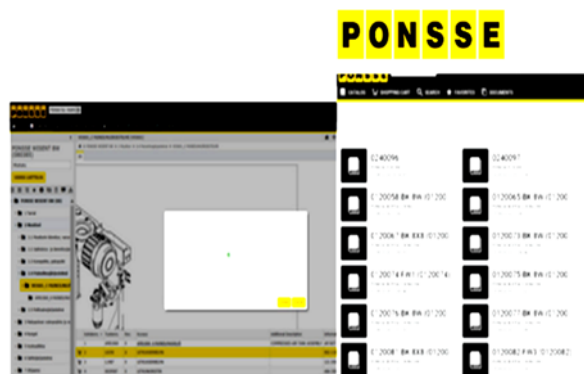


Рисунок 5. Интерфейс Parts Online  
 Источник: Собственная схема авторов  
 Figure 5. Parts Online Interface  
 Source: Authors' own scheme

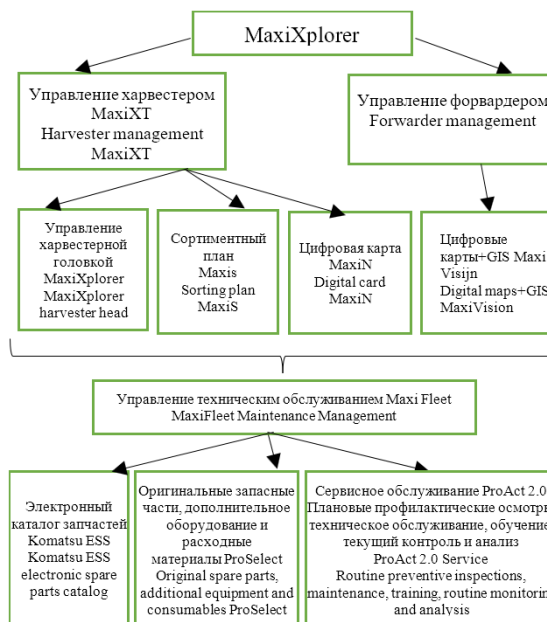


Рисунок 6. Управление парком машин Komatsu  
 Источник: Собственная схема авторов  
 Figure 6. Komatsu Fleet Management  
 Source: Authors' own scheme

Crane calibration	Calibration crane sensor	Crane slewing	Crane out/in	General
60 10	60 15	45 0	0 90	330
60 10	60 15	45 0	0 90	330
75 8	75 20	25 0	0 90	330
55 8	55 20	25 0	0 90	330
60 8	60 20	25 0	0 90	330
60 8	60 20	25 0	0 90	330
60 8	60 20	25 0	0 90	330
60 8	60 20	25 0	0 90	330
70 10	20 0	0 0	0 90	410
70 10	20 0	0 0	0 90	410
100				325

Рисунок 7. Интерфейс программы MaxiXplorer  
 Источник: Собственная схема авторов  
 Figure 7. MaxiXplorer program interface  
 Source: Authors' own scheme

Система управления харвестером MaxiXT (рис. 8) позволяет управлять всеми процессами, начиная от управления двигателем и манипулятором до управления системой выравнивания кабины, трансмиссией и опусканием/подниманием лестницы. Поддерживает неограниченное количество пользователей, а также несколько различных профилей оператора для работы в разных условиях.

Для управления харвестерной головкой используется программа MaxiXT Head (рис. 9), позволяющая эффективно выполнять операции по раскряжке и обрезке сучьев.

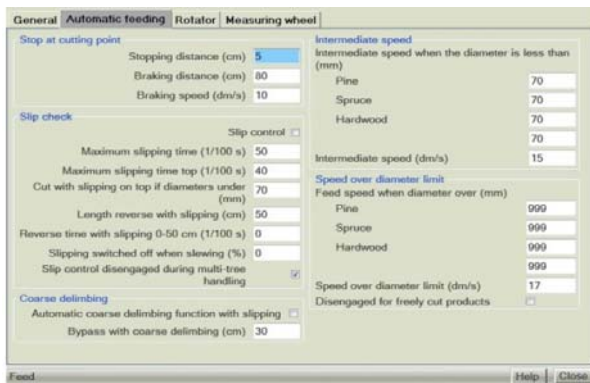


Рисунок 8. Интерфейс программы MaxixT

Источник: Собственная схема авторов

Figure 8. Maxixe program Interface

Source: Authors' own scheme

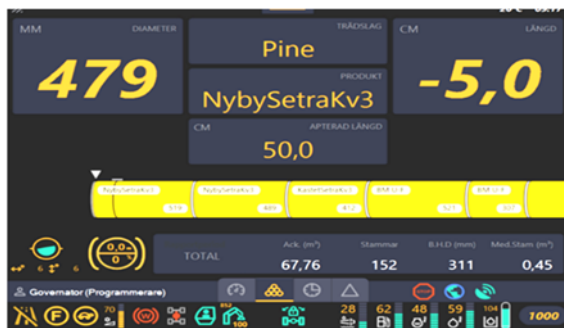


Рисунок 9. Интерфейс программы MaxixT Head

Источник: Собственная схема авторов

Figure 9. Maxixe Head program Interface

Source: Authors' own scheme

MaxiS дает возможность отображать профили стволов и распечатывать перечни-спецификации лесоматериалов.

MaxiN обрабатывает карты в машине с нанесением выработанной продукции, позволяет импортировать объект с картами и GIS-информацией, отображает маршрут и продукцию на карте, рассчитывает площади и расстояния.

Управление техническим обслуживанием осуществляется с помощью программы MaxiFleet (рис. 10), обеспечивающей дистанционное управление работой ряда систем, оказание технической поддержки оператору, в проведении инструментального сравнения и анализа эксплуатационных показателей как отдельной машины, так и всего парка.

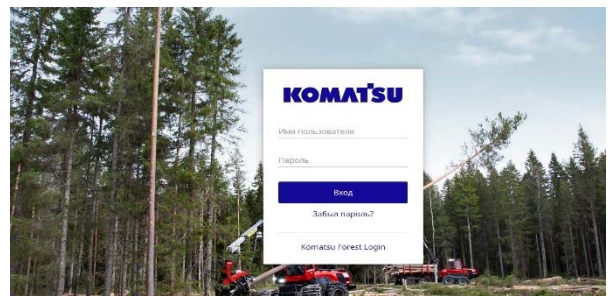


Рисунок 10. Интерфейс сайта доступа программы

Источник: Собственная схема авторов

Figure 10. Interface of the program access site

Source: Authors' own scheme

В систему включается:

- Электронный каталог запчастей ESS (рис. 11), позволяющий осуществлять поиск любых запасных частей, выводит покомпонентные схемы узлов, содержит пособия-руководства.

- ProSelect объединяет оригинальные запасные части, дополнительное оборудование и расходные материалы, которые разработаны специально для машины Komatsu в соответствии со строгими критериями качества.

- ProAct 2.0 – концепция сервиса, позволяющая получить все услуги по обслуживанию техники по твердой, низкой цене, на базе фактически отработанных моточасов.

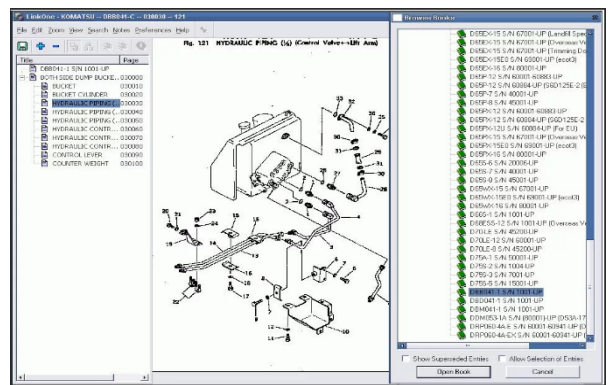


Рисунок 11. Электронный каталог запчастей ESS

Источник: Собственная схема авторов

Figure 11. Electronic catalog of ESS spare parts

Source: Authors' own scheme

Вся информация по техническому обслуживанию, осуществляемому дилерскими центрами, доступна после авторизации на сайте компании (рис. 12).

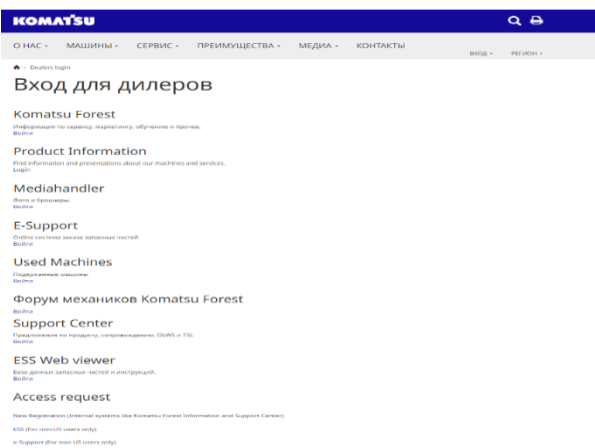


Рисунок 12. Скриншот страницы компании Komatsu для дилеров

Источник: Собственная схема авторов

Figure 12. Screenshot of the Komatsu company page for dealers

Source: Authors' own scheme

Компания John Deere разработала современные интеллектуальные системы измерения, контроля и обмена данными, применение которых дает возможность максимального использования потенциала парка лесозаготовительной техники компании. Указанные системы оборудованы современным интерфейсом, при этом их функциональные возможности направлены на достижение максимальной производительности. Программные продукты, позволяющие управлять работой техники, ее обслуживанием, представлены на рис. 13.

Для управления харвестерами и форвардерами серии E разработана система управления TimberMatic, упрощающая процесс переобучения.

Использование единого пользовательского интерфейса для управления базовой машиной, системой измерения и харвестерной головкой дает возможность настройки большинства параметров работы харвестера с рабочего места оператора (рис. 14).

На форвардерах серии E применяется система управления TimberMatic F-12 (рис. 15), осуществляющая в едином пользовательском интерфейсе управление базовой машиной и системой взвешивания, а также выводящей, при необходимости, руководство по эксплуатации системы управления с нужной информацией.

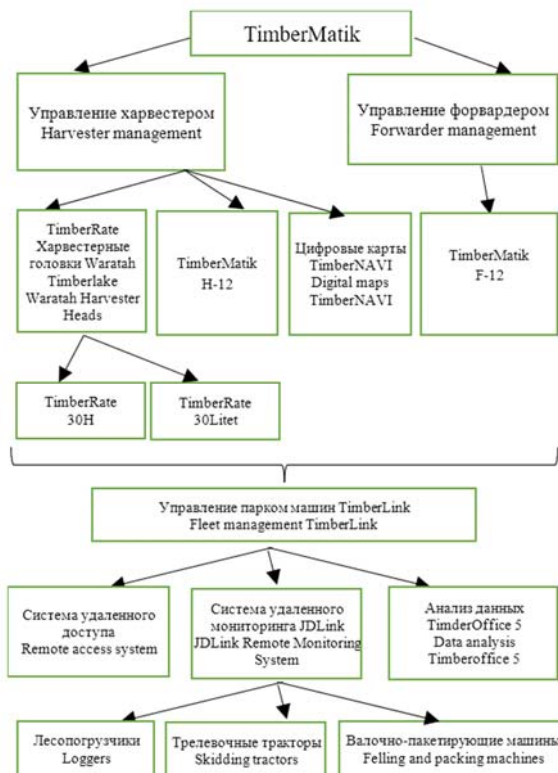


Рисунок 13. Управление парком машин John Deere

Источник: Собственная схема авторов

Figure 13. John Deere Fleet Management

Source: Authors' own scheme



Рисунок 14. Интерфейс системы управления харвестером TimberMatic H-12

Источник: Собственная схема авторов

Figure 14. Interface of the TimberMatic H-12 harvester control system

Source: Authors' own scheme





Рисунок 15. Интерфейс системы управления форвардером TimberMatic F-12

Источник: Собственная схема авторов

Figure 15. Interface of the TimberMatic F-12 forwarder control system

Source: Authors' owns cheme

Обучение работой возможно путем использования компьютерного симулятора.

Для харвестерных головок Waratah серии 200, 400, 600 используются управляющие и измерительные системы TimberRite (рис. 16), управляющие посредством интеллектуальных систем рабочей нагрузкой, доступом к информации в режиме реального времени и беспроводной передачей данных о производительности и параметрах харвестерной головки для обеспечения максимально возможной производительности. Кроме того, TimberRite предоставляет необходимую статистику по работе и ремонту. Разработаны 2 варианта TimberRite:



Рисунок 16. Интерфейс системы управления харвестерной головкой Waratah TimberRite

Источник: Собственная схема авторов

Figure 16. Interface of the Waratah TimberRite harvester head control System

Source: Authors' ownscheme

Для управления на базе персонального компьютера харвестерной/обрабатывающей головкой с функциями измерения и раскряжевки леса разработана система TimberRite 30Lite, обладающая большей функциональностью, чем 30Lite и позволяющая работать с электронной почтой, передавать данные по каналу GSM или GPRS посредством спутникового телефона или USB-носителя. Также она оптимизирует обработку стволов деревьев при раскряжевке.

Контроль всех основных функций и выполнение регулировок машин осуществляется посредством TimberLink (рис. 17), позволяющей достичь и поддерживать высокую производительность при минимизации расхода топлива, а также дающей возможность выполнения профилактического технического обслуживания.

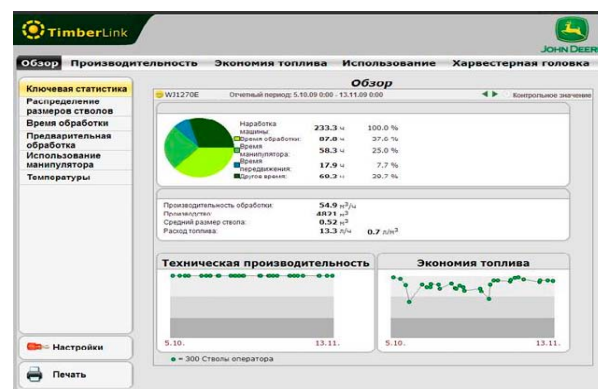


Рисунок 17. Интерфейс системы управления TimberLink

Источник: Собственная схема авторов

Figure 17. TimberLink Management System Interface

Source: Authors' own scheme

Назначение TimberLink:

- мониторинг текущей производительности и эксплуатационных характеристик машины;
- своевременный контроль технического состояния машины;
- раннее определение потенциальных неисправностей и увеличение, за счет этого, срока продуктивной эксплуатации машины и компонентов путем своевременного проведения профилактического технического обслуживания;
- определение необходимости изменения параметров машины;

- достижение топливной экономичности при эксплуатации.

Система JDLink (рис. 18) обеспечивает быструю и точную дистанционную диагностику машин марки – это харвестеры, форвардеры, трелевочные тракторы, лесопогрузчики, валочно-пакетирующие машины. Применение системы позволяет сервисной службе быстрее отреагировать на выявление неполадок.

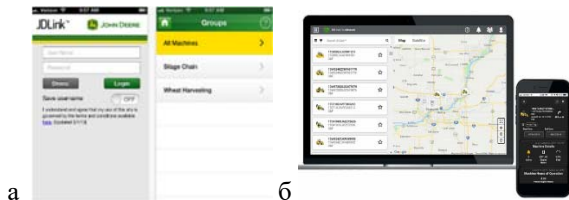


Рисунок 18. Система JDLink:

а – пример интерфейса, б – мобильная версия

Источник: Собственная схема авторов

Figure 18. JDLink System:

a is an example of the interface, b is the mobile version

Source: Authors' own scheme

### Обсуждение

На основе анализа полученных сравнительных характеристик цифровых сервисов необходимо отметить, что производители лесозаготовительной техники серьезно подходят к решению вопроса повышения эффективности ее деятельности, предлагая лесозаготовительным компаниям эффективные системы управления работой и техническим обслуживанием машин.

Однако, на наш взгляд, в модели цифровой экосистемы рассмотренных компаний не хватает модуля, связанного с планированием лесозаготовок (рис.19), что не позволяет эффективно увязать требуемое количество техники (харвестеров, форвардеров, погрузчиков, трелевщиков) с планируемыми объемами заготовки древесины и последующим лесовосстановлением [37], а также согласовать их работу и производительность с техническим обслуживанием и ремонтом.

Например, при заготовке древесины с использованием харвестера предлагается использовать данные о проходимости харвестера для составления карты проходимости для форвардера, что повысит эффективность его работы [26, 27, 28].

Несбалансированность объемов выработки разными машинами, применяемыми на лесозаготовках, ведет к простоям наиболее производительных (головных) машин и снижению общего объема их выработки до минимального на одной из основных операций [9].



Рисунок 19. Модель цифровой экосистемы лесозаготовительной техники

Источник: Собственная схема авторов

Figure 19. A model of the digital ecosystem of logging equipment

Source: Authors' own scheme

Цифровизация многих отраслей промышленности позволяет повысить эффективность работы компаний, в том числе и в области лесного хозяйства. Важность этого осознана и государством, и частными компаниями. Необходимо отметить, что практически полная потеря российскими производителями объемов производства лесозаготовительной техники, а также компетенций по их производству привела к полной зависимости от иностранных производителей [29]. В нынешних условиях наметился интерес к технике отечественного производства, однако для конкуренции с зарубежными производителями требуется время, при этом зарубежные компании продолжают совершенствовать выпускаемую технику, делая ее все более интеллектуальной, в том числе применяя цифровые двойники [30].

Основные зарубежные производители лесозаготовительной техники, такие как «Ponsse», «Komatsu», «John Deere», уделяют большое внимание вопросам цифровизации работы и технического

обслуживания выпускаемых ими лесозаготовительных машин. Цифровизация дает возможность контролировать объемы заготовленной древесины, оптимизировать сортиментные планы для получения максимальной выгоды, осуществлять удаленный мониторинг технического состояния машин, организовывать их техническое обслуживание и ремонт на достаточно высоком уровне.

### Заключение

Современный уровень использования высокопроизводительных и дорогостоящих лесозаготовительных машин, применяемых на разных этапах производственного цикла, должен обеспечиваться за счет оперативного планирования и управления, позволяющих обеспечивать высокую эффективность их применения. В то же время, отсутствие в рассмотренном программном обеспечении ведущих компаний модуля моделирования и планирования лесозаготовительных процессов снижает их эффективность, поэтому должно быть доработано.

Современный уровень использования высокопроизводительных и дорогостоящих лесозаготовительных машин, применяемых на разных этапах производственного цикла, должен обеспечиваться за счет оперативного планирования и управления, позволяющих обеспечивать высокую эффективность их применения. В то же время, отсутствие в рассмотренном программном обеспечении ведущих компаний модуля моделирования и планирования лесозаготовительных процессов снижает их эффективность, поэтому должно быть доработано.

### Список литературы

1. Tolstykh T.O., Afonin S.E. Strategic development of scientific and technical potential of industry during the digital transformation of economy. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2021;14(4):410-417. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2021-4-410-417>
2. Erboz G. (2020). A qualitative study on industry 4.0 competitiveness in Turkey using Porter diamond model. *Journal of Industrial Engineering and Management* 13(2):266 DOI: 10.3926/jiem.2915
3. Gavrilović, N., Mishra, A. (2021). Software architecture of the internet of things (IoT) for smart city, healthcare and agriculture: analysis and improvement directions. *J Ambient Intell Human Comput* 12, 1315–1336. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02197-3>
4. Parshina I.S., Frolov E.B. Development of a digital twin of the production system on the basis of modern digital technologies. *Ekonomika v promyshlennosti = Russian Journal of Industrial Economics*, 2020. Vol. 13. No. 1. Pp. 29–34. (In Russ.). DOI: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34
5. Ashtari, Behrang & Jung, Tobias & Lindemann, Benjamin & Sahlab, Nada & Jazdi, Nasser & Schloegl, Wolfgang & Weyrich, Michael. (2019). An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System. at - *Automatisierungstechnik*. 67. 762-72. DOI: 10.1515/auto-2019-0039.8
6. Shvedenko, Vladimir & Mozokhin, Andrey. (2020). Concept of digital twins at life cycle stages of production systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 20. 815-827. 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827.
7. Программное обеспечение для управления лесохозяйственным и лесозаготовительным процессами: оценка применимости / А. Н. Заикин, В. В. Сиваков, В. А. Зеликов [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2022. Т.12, № 1(45). С.96-109. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/8
8. Danilović, Milorad & Antonić, Slavica & Stojnić, Dušan & Cirovic, Vladimir & Milikić, Dragiša. (2022). Productivity of Komatsu 951G harvester in tree felling and production wood assortments in forest area damaged by wind. *Topola*. 5-11. DOI:10.5937/topola2209005D.
9. Применение комплексов лесозаготовительных машин в условиях Республики Башкортостан / А. Н. Заикин, В. В. Сиваков, Н. А. Булхов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2022. № 3(387). С. 139-152. DOI 10.37482/0536-1036-2022-3-139-152.
10. Labelle, Eric R. & Kemmerer, Julia. (2022). Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*. 43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.
11. Söderberg, Jon & Wallerman, Jörgen & Almäng, Anders & Möller, Johan & Willén, Erik. (2021). Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 36. 1-9. DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751.

12. Гурский А.С. Использование транспортной телематики и дистанционной диагностики для совершенствования технического обслуживания и ремонта транспортных средств / А. С. Гурский, В. С. Ивашко // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2020. Т.65. №3. С.375-383. DOI 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.
13. Kim, Gyun-Hyung & Kim, Ki-Duck & Lee, Hyeon-Seung & Choi, Yunsung & Mun, Ho-Seong & Oh, Jae-Heun & Shin, Beom-Soo. (2021). Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.
14. Kemmerer, Julia & Labelle, Eric R.. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
15. Kemmerer, Julia & Labelle, Eric R.. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
16. Техническое обслуживание технологических машин на базе цифровизации / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, А. Р. Юсупов, Т. Н. Круглова // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19. № 1. С. 74-80. DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80.
17. Побединский В. В., Ляхов С. В., Салихова М. Н., Иовлев Г. А. Моделирование процессов ТО и Р парка лесозаготовительных машин с учетом производственной эксплуатации // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2020. № 4. С. 3-11. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44572456>
18. Заикин А. Н., Сиваков В. В., Новикова Т. П., Зеликов В. А., Стасюк В. В., Чуйков А. С. Программное обеспечение для управления системой технического обслуживания и ремонта лесных машин: оценка применимости // *Лесотехнический журнал*. 2023. Т.13. № 2 (50). С. 105–127. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6.
19. Rätty, Janne & Hauglin, Marius & Astrup, Rasmus & Breidenbach, Johannes. (2022). Assessing and mitigating systematic errors in forest attribute maps utilizing harvester and airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Forest Research*. DOI: 10.1139/cjfr-2022-0053.
20. Lopatin, Evgeny & Väättäinen, Kari & Kukko, Antero & Kaartinen, Harri & Hyypä, Juha & Holmström, Eero & Sikanen, Lauri & Nuutinen, Yrjö & Routa, Johanna. (2023). Unlocking Digitalization in Forest Operations with Viewshed Analysis to Improve GNSS Positioning Accuracy. *Forests*. 14. 689. DOI: 10.3390/f14040689.
21. Ovaskainen, Heikki. (2005). Comparison of harvester work in forest and simulator environments. *Silva Fennica*. 39. DOI: 10.14214/sf.398.
22. Capocchi, Irene & Neri, Francesco & Borghini, Tommaso & Bernetti, Iacopo. (2023). Use of virtual reality technology in chainsaw operations, education and training. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. DOI: 10.1093/forestry/cpad007.
23. Rukomoynikov, K.P. & Sergeeva, T.V. & Gilyazova, T.A. & Tsarev, E.M. & Anisimov, P.N. (2023). Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system. *Forestry Bulletin*. 27. 69-80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80.
24. Заикин А.Н., Сиваков В.В., Никитин В.В., Брионес А.А. Программное обеспечение в лесном хозяйстве и при лесозаготовках // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2023. Т.27. № 4. С. 172–184. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-172-184
25. Brewer, Julia & Talbot, Bruce & Belbo, Helmer & Ackerman, Pierre & Ackerman, Simon. (2018). A comparison of two methods of data collection for modelling productivity of harvesters: Manual time study and follow-up study using on-board-computer stem records. *Annals of Forest Research*. 61. DOI: 10.15287/af.2018.962.
26. Ala-Ilomäki, Jari & Salmivaara, Aura & Launiainen, Samuli & Lindeman, Harri & Kulju, Sampo & Finér, Leena & Heikkonen, Jukka & Uusitalo, Jori. (2020). Assessing extraction trail trafficability using harvester CAN-bus data. *International Journal of Forest Engineering*. 31. 1-8. DOI: 10.1080/14942119.2020.1748958.
27. Salmivaara, Aura & Launiainen, Samuli & Perttunen, Jari & Nevalainen, Paavo & Pohjankukka, Jonne & Ala-Ilomäki, Jari & Sirén, Matti & Laurén, Ari & Tuominen, Sakari & Uusitalo, Jori & Pahikkala, Tapio & Heikkonen,



Jukka & Finér, Leena. (2020). Towards dynamic forest trafficability prediction using open spatial data, hydrological modelling and sensor technology. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 93. 662-674. DOI: 10.1093/forestry/cpaa010.

28. Gagliardi, Kayla & Ackerman, Simon & Ackerman, Pierre. (2020). Multi-Product Forwarder-Based Timber Extraction: Time Consumption and Productivity Analysis of Two Forwarder Models Over Multiple Products and Extraction Distances. *Croatian journal of forest engineering*. 41. DOI: 10.5552/crojfe.2020.736.

29. Пискунов М.А. Особенности российского рынка лесозаготовительной техники // *Лесн. журн.* 2020. №6. С.132–147. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-132-147

30. Erpalov, A. & Khoroshevskii, K. & Gadolina, Irina. (2023). Actual problems of creating digital twins of machine engineering products in terms of durability assessment. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 89. 67-75. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-8-67-75.

31. Новиков, А. И. Алгоритм решения задачи оптимального распределения работ в сетевых канонических структурах / А. И. Новиков [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2014. – Т. 4, № 4(16). – С. 309-317. – DOI 10.12737/8515. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/tondhd>.

32. Дорохин, С.В. Математическая модель распределения трудовых ресурсов при технической эксплуатации и ремонте автотранспортных средств / С. В. Дорохин [и др.] // *Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса*. – Орел, 2016. – С. 133-139. <https://elibrary.ru/vxxdjz>.

33. Беляева, Т. П. Оптимальное планирование комплексных проектов создания электронной компонентной базы / Т. П. Беляева, А. П. Затворницкий // *Информационные системы и технологии*. – 2013. – № 3(65). – С. 5-10. <https://elibrary.ru/ntnxin>.

34. Novikova, T. P. Economic evaluation of mathematical methods application in the management systems of electronic component base development for forest machines / T. P. Novikova, A. I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 392. – P. 012035. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012035>.

35. Sokolov, S. V. Determining the Initial Orientation for Navigation and Measurement Systems of Mobile Apparatus in Reforestation / S. V. Sokolov, A. I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 56. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040056>.

36. How to Increase the Analog-to-Digital Converter Speed in Optoelectronic Systems of the Seed Quality Rapid Analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamensky, A. I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/dkxphx>.

37. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>. URL: <https://elibrary.ru/uxpfiq>.

38. К вопросу развития системы энергообразования двигателей внутреннего сгорания / С. В. Дорохин [и др.] // *Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования*. – Воронеж, 2014. – Том 1. – С. 272-274. Режим доступа: <https://elibrary.ru/slkaqt>.

39. Патент № 2714705 Российская Федерация, МПК А01G 23/00. Способ восстановления леса : № 2019115418 : заявл. 20.05.2019 : опубл. 19.02.2020 / А. И. Новиков. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/gzdlvj>.

40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667363 Российская Федерация. Информационная система для участка по ремонту автотранспорта и механизмов : № 2021666981 : заявл. 28.10.2021 : опубл. 28.10.2021 / С. А. Морозов [и др.]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/nrywgh>.

41. Новикова, Т. В. Разработка алгоритма и модели функционирования информационной системы для малого сельскохозяйственного предприятия / Т. В. Новикова [и др.] // *Моделирование систем и процессов*. – 2020. – Т. 13, № 4. С. 53-58. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-13-4-53-58. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/qdcyju>.

42. Novikov, A.I. Production of Complex Knowledgebased Systems: Optimal Distribution of Labor Resources Management in the Globalization Context / A. I. Novikov [et al.] // Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecke Teplice, Slovak Republic. – Rajecke Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 2275-2281. – URL: <https://www.elibrary.ru/yxkpwh>.
43. Авсева, О.В. Математическая модель оптимального распределения работ в сетевых канонических структурах / О. В. Авсева [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 5(301). – С. 48-52. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/sjqbtb>.
44. Евтеев, М.Д. Наноэлектроника: очередной этап развития электронной техники / М. Д. Евтеев [и др.] // Техника и технологии: пути инновационного развития. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2013. – С. 140-142. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/tjbbkj>.
45. Achkasov, V. N. Controlling means of development electronic component basis / V. N. Achkasov [et al.]. – Lorman, MS, USA : Science Book Publishing House LLC, 2013. – 130 p. – ISBN 978-1-62174-001-8. – <https://www.elibrary.ru/rewhat>.
46. Лядов, В.В. Облачные технологии – становление и перспективы развития / В. В. Лядов [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2013. – № 1. – С. 37-39. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/rbjpfr>.
47. Затворницкий, А. П. Оптимальное планирование комплексных проектов создания электронной компонентной базы / А. П. Затворницкий // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 3(65). – С. 5-10. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/ntnxin>.
48. Гидромеханические трансмиссии лесотранспортных машин: технологическая связь с воздействием на почвенно-растительную среду / П. А. Сокол [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 2(50). – С. 179-197. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/PJGNOX>.
49. Евдокимова, С. А. Применение алгоритмов кластеризации для анализа клиентской базы магазина / С. А. Евдокимова [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 4-12. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-14-2-4-12. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/DXGWQN>.
50. Евдокимова, С. А. Анализ товарного ассортимента запасных частей дилерского предприятия автомобильного сервиса с помощью алгоритма FP-Growth / С. А. Евдокимова [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 4. – С. 24-33. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-4-24-33. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/jcnghb>.

### References

1. Tolstykh T.O., Afonin S.E. Strategic development of scientific and technical potential of industry during the digital transformation of economy. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2021;14(4):410-417. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2021-4-410-417>
2. Erboz G. (2020). A qualitative study on industry 4.0 competitiveness in Turkey using Porter diamond model. *Journal of Industrial Engineering and Management* 13(2):266 DOI: 10.3926/jiem.2915
3. Gavrilović, N., Mishra, A. (2021). Software architecture of the internet of things (IoT) for smart city, healthcare and agriculture: analysis and improvement directions. *J Ambient Intell Human Comput* 12, 1315–1336. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02197-3>
4. Parshina I.S., Frolov E.B. Development of a digital twin of the production system on the basis of modern digital technologies. *Ekonomika v promyshlennosti = Russian Journal of Industrial Economics*, 2020. Vol. 13. No. 1. Pp. 29–34. (In Russ.). DOI: 10.17073/2072-1633-2020-1-29-34
5. Ashtari, Behrang & Jung, Tobias & Lindemann, Benjamin & Sahlab, Nada & Jazdi, Nasser & Schloegl, Wolfgang & Weyrich, Michael. (2019). An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System. at - *Automatisierungstechnik*. 67. 762-72. DOI: 10.1515/auto-2019-0039.8

6. Shvedenko, Vladimir & Mozokhin, Andrey. (2020). Concept of digital twins at life cycle stages of production systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 20. 815-827. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827.
7. Programmnoe obespechenie dlya upravleniya lesohozyajstvennym i lesozagotovitel'nym processami: ocenka primenimosti / A. N. Zaikin, V. V. Sivakov, V. A. Zelikov [i dr.] // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2022. T.12, № 1(45). S.96-109. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/
8. Danilović, Milorad & Antić, Slavica & Stojnić, Dušan & Cirovic, Vladimir & Milikić, Dragiša. (2022). Productivity of Komatsu 951G harvester in tree felling and production wood assortments in forest area damaged by wind. *Topola*. 5-11. DOI:10.5937/topola2209005D.
9. Primenenie kompleksov lesozagotovitel'nyh mashin v usloviyah Respubliki Bashkortostan / A. N. Zaikin, V. V. Sivakov, N. A. Bulhov [i dr.] // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2022. № 3(387). S. 139-152. DOI 10.37482/0536-1036-2022-3-139-152.
10. Labelle, Eric R. & Kemmerer, Julia. (2022). Business Process Reengineering of a Large-Scale Public Forest Enterprise Through Harvester Data Integration. *Croatian journal of forest engineering*. 43. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1129.
11. Söderberg, Jon & Wallerman, Jörgen & Almäng, Anders & Möller, Johan & Willén, Erik. (2021). Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 36. 1-9. DOI: 10.1080/02827581.2021.1919751.
12. Gurskij A.S. Ispol'zovanie transportnoj telematiki i distancionnoj diagnostiki dlya sovershenstvovaniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta transportnyh sredstv / A. S. Gurskij, V. S. Ivashko // *Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*. 2020. T.65. №3. S.375-383. DOI 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.
13. Kim, Gyun-Hyung & Kim, Ki-Duck & Lee, Hyeon-Seung & Choi, Yunsung & Mun, Ho-Seong & Oh, Jae-Heun & Shin, Beom-Soo. (2021). Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.
14. Kemmerer, Julia & Labelle, Eric R.. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
15. Kemmerer, Julia & Labelle, Eric R.. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*. 140. DOI: 10.1007/s10342-020-01313-4.
16. Tekhnicheskoe obsluzhivanie tekhnologicheskikh mashin na baze cifrovizacii / A. K. Tugengol'd, R. N. Voloshin, A. R. YUsupov, T. N. Kruglova // *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. T. 19. № 1. S.74-80. DOI 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80.
17. Pobedinskij V. V., Lyahov S. V., Salihova M. N., Iovlev G. A. Modelirovanie processov TO i R parka lesozagotovitel'nyh mashin s uchetom proizvodstvennoj ekspluatcii // *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*. 2020. № 4. S. 3-11. Rezhim dostupa: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44572456>
18. Zaikin A. N., Sivakov V. V., Novikova T. P., Zelikov V. A., Stasyuk V. V., CHujkov A. S. Programmnoe obespechenie dlya upravleniya sistemoy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lesnyh mashin: ocenka primenimosti // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2023. T.13. № 2 (50). S. 105–127. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6.
19. Rätty, Janne & Hauglin, Marius & Astrup, Rasmus & Breidenbach, Johannes. (2022). Assessing and mitigating systematic errors in forest attribute maps utilizing harvester and airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Forest Research*. DOI: 10.1139/cjfr-2022-0053.
20. Lopatin, Evgeny & Väätäinen, Kari & Kukko, Antero & Kaartinen, Harri & Hyypä, Juha & Holmström, Eero & Sikanen, Lauri & Nuutinen, Yrjö & Routa, Johanna. (2023). Unlocking Digitalization in Forest Operations with Viewshed Analysis to Improve GNSS Positioning Accuracy. *Forests*. 14. 689. DOI: 10.3390/f14040689.
21. Ovaskainen, Heikki. (2005). Comparison of harvester work in forest and simulator environments. *Silva Fennica*. 39. DOI: 10.14214/sf.398.

22. Capecchi, Irene & Neri, Francesco & Borghini, Tommaso & Bernetti, Iacopo. (2023). Use of virtual reality technology in chainsaw operations, education and training. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. DOI: 10.1093/forestry/cpad007.
23. Rukomoynikov, K.P. & Sergeeva, T.V. & Gilyazova, T.A. & Tsarev, E.M. & Anisimov, P.N. (2023). Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system. *Forestry Bulletin*. 27. 69-80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80.
24. Zaikin A.N., Sivakov V.V., Nikitin V.V., Briones A.A. Programmnoe obespechenie v lesnom hozyajstve i pri lesozagotovkah // *Lesnoj vestnik / Forestry Bulletin*, 2023. T.27. № 4. S. 172–184. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-172-184
25. Brewer, Julia & Talbot, Bruce & Belbo, Helmer & Ackerman, Pierre & Ackerman, Simon. (2018). A comparison of two methods of data collection for modelling productivity of harvesters: Manual time study and follow-up study using on-board-computer stem records. *Annals of Forest Research*. 61. DOI: 10.15287/afr.2018.962.
26. Ala-Ilomäki, Jari & Salmivaara, Aura & Launiainen, Samuli & Lindeman, Harri & Kulju, Sampo & Finér, Leena & Heikkonen, Jukka & Uusitalo, Jori. (2020). Assessing extraction trail trafficability using harvester CAN-bus data. *International Journal of Forest Engineering*. 31. 1-8. DOI: 10.1080/14942119.2020.1748958.
27. Salmivaara, Aura & Launiainen, Samuli & Perttunen, Jari & Nevalainen, Paavo & Pohjankukka, Jonne & Ala-Ilomäki, Jari & Sirén, Matti & Laurén, Ari & Tuominen, Sakari & Uusitalo, Jori & Pahikkala, Tapio & Heikkonen, Jukka & Finér, Leena. (2020). Towards dynamic forest trafficability prediction using open spatial data, hydrological modelling and sensor technology. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 93. 662-674. DOI: 10.1093/forestry/cpaa010.
28. Gagliardi, Kayla & Ackerman, Simon & Ackerman, Pierre. (2020). Multi-Product Forwarder-Based Timber Extraction: Time Consumption and Productivity Analysis of Two Forwarder Models Over Multiple Products and Extraction Distances. *Croatian journal of forest engineering*. 41. DOI: 10.5552/crojfe.2020.736.
29. Piskunov M.A. Osobennosti rossijskogo rynka lesozagotovitel'noj tekhniki // *Lesn. zhurn*. 2020. №6. S.132–147. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-132-147
30. Erpalov, A. & Khoroshevskii, K. & Gadolina, Irina. (2023). Actual problems of creating digital twins of machine engineering products in terms of durability assessment. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 89. 67-75. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-8-67-75.
31. Novikov, A. I. Algorithm for solving the problem of optimal distribution of work in network canonical structures / A. I. Novikov [et al.] // *Forestry engineering Journal*. – 2014. – Vol. 4, No. 4(16). – pp. 309-317. – DOI 10.12737/8515. –URL: <https://elibrary.ru/tondhd>.
32. Dorokhin, S.V. Mathematical model of the distribution of labor resources in the technical operation and repair of motor vehicles / S.V. Dorokhin [et al.] // *Forestry engineering Journal*. – 2014. - Vol. 4, no. 4(16). - pp. 309-317. URL: <https://elibrary.ru/vxxdjz>.
33. Belyaeva, T. P. Optimal planning of complex projects for the creation of an electronic component base / T. P. Belyaeva, A. P. Zatvornitsky // *Information systems and technologies*. – 2013. – № 3(65). – P. 5-10. – <https://elibrary.ru/ntnxin>
34. Novikova, T. P. Economic evaluation of mathematical methods application in the management systems of electronic component base development for forest machines / T. P. Novikova, A. I. Novikov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 392. – P. 012035. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012035>.
35. Sokolov, S. V. Determining the Initial Orientation for Navigation and Measurement Systems of Mobile Apparatus in Reforestation / S. V. Sokolov, A. I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 56. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040056>.

36. How to Increase the Analog-to-Digital Converter Speed in Optoelectronic Systems of the Seed Quality Rapid Analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamensky, A. I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/dkxphx>.
37. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>. URL: <https://elibrary.ru/uxpfiq>.
38. On the issue of the development of the system of energy formation of internal combustion engines / S. V. Dorokhin [et al.] // *Alternative energy sources in road transport: problems and prospects of rational use*. – Voronezh, 2014. – Iss. 1. – P. 272-274. URL: <https://elibrary.ru/slkaqt>.
39. Patent No. 2714705 Russian Federation. Method of forest restoration / A. I. Novikov. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/gzdlvj>.
40. Certificate of state registration of the computer program No. 2021667363 Russian Federation. Information system for the site for the repair of vehicles and mechanisms : No. 2021666981 : application 28.10.2021 : publ. 28.10.2021 / S. A. Morozov [et al.]. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/nrywgh>.
41. Novikova, T. V. Development of an algorithm and a model of the functioning of an information system for a small agricultural enterprise / T. V. Novikova [et al.] // *Modeling of systems and processes*. – 2020. – Vol. 13, No. 4. pp. 53-58. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-13-4-53-58. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/qdcyjv>.
42. Novikov, A.I. Production of Complex Knowledgebased Systems: Optimal Distribution of Labor Resources Management in the Globalization Context / A. I. Novikov [et al.] // *Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecke Teplice, Slovak Republic*. – Rajecke Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 2275-2281. – URL: <https://www.elibrary.ru/yxkpwH>.
43. Avseeva, O.V. Mathematical model of optimal distribution of work in network canonical structures / O. V. Avseeva [et al.] // *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. – 2013. – № 5(301). – Pp. 48-52. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/sjqbtb>.
44. Evteev, M.D. Nanoelectronics: the next stage in the development of electronic technology / M. D. Evteev [et al.] // *Technique and technology: ways of innovative development*. – Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2013. – pp. 140-142. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/tjbbkj>.
45. Achkasov, V. N. Controlling means of development electronic component basis / V. N. Achkasov [et al.]. – Lorman, MS, USA : Science Book Publishing House LLC, 2013. – 130 p. – ISBN 978-1-62174-001-8. – <https://www.elibrary.ru/rewhat>.
46. Lyadov, V.V. Cloud technologies – formation and prospects of development / V. V. Lyadov [et al.] // *Modeling of systems and processes*. - 2013. – No. 1. – pp. 37-39. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/rbpjfr>.
47. Zatvornitsky, A. P. Optimal planning of complex projects for the creation of an electronic component base / A. P. Zatvornitsky // *Information systems and technologies*. – 2013. – № 3(65). – P. 5-10. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/ntnxin>.
48. Hydromechanical transmissions of forest transport vehicles: technological connection with the impact on the soil and plant environment / P. A. Sokol [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – V. 13, № 2(50). – P. 179-197. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10. – URL: <https://www.elibrary.ru/PJGNOX>.
49. Evdokimova, S. A. Application of clustering algorithms for the analysis of the customer base of the store / S. A. Evdokimova [et al.] // *Modeling of systems and processes*. – 2021. – V. 14, № 2. – P. 4-12. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-14-2-4-12. – URL: <https://www.elibrary.ru/DXGWQN>.
50. Evdokimova, S. A. Analysis of the product range of spare parts of an automobile service dealer enterprise using the FP-Growth algorithm / S. A. Evdokimova [et al.] // *Modeling of systems and processes*. – 2022. – T. 15, № 4. – C. 24-33. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-4-24-33. – URL: <https://www.elibrary.ru/jenghb>.

## Сведения об авторах

*Сиваков Владимир Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры "Транспортно-технологические машины и сервис" ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, Российская Федерация, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, e-mail: [sv@bgitu.ru](mailto:sv@bgitu.ru).

*Заикин Анатолий Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры "Транспортно-технологические машины и сервис" ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, Российская Федерация, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1831-6893>, e-mail: [zaikin.anatolij@yandex.ru](mailto:zaikin.anatolij@yandex.ru).

*Новикова Татьяна Петровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru).

*Зеликов Владимир Анатольевич* – доктор технических наук, доцент кафедры 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](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

✉ *Стасюк Владимир Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры 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/0000-0002-8689-955X>, e-mail: [stasiuk.volodya@yandex.ru](mailto:stasiuk.volodya@yandex.ru).

*Чуйков Алексей Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, Республика Беларусь, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: [offlex88@belstu.by](mailto:offlex88@belstu.by).

## Information about the authors

*Vladimir V. Sivakov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Technological University of Engineering, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, e-mail: [sv@bgitu.ru](mailto:sv@bgitu.ru).

*Anatolii N. Zaikin* – Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Technological University of Engineering, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1831-6893>, e-mail: [zaikin.anatolij@yandex.ru](mailto:zaikin.anatolij@yandex.ru).

*Tatyana P. Novikova* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Technology and Microelectronic Engineering, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru).

*Vladimir A. Zelikov* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Transportation Organization 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](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

✉ *Vladimir V. Stasiuk* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transportation Organization 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/0000-0002-8689-955X>, e-mail: [stasiuk.volodya@yandex.ru](mailto:stasiuk.volodya@yandex.ru).

*Alexey S. Chuikov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarussian State Technological University, 13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: [offlex88@belstu.by](mailto:offlex88@belstu.by).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/15>

УДК 630\*812.3



## Трещинообразование натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth): эффект показателя внутреннего трения под влиянием внешних возмущений

Александр В. Руссу<sup>1</sup>, [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-8525-0348>

Владимир А. Шамаев<sup>1</sup> , [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Андрис Зимелис<sup>2</sup>, [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv)  <https://orcid.org/0000-0001-6919-9263>

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

<sup>2</sup>Технический университет г. Рига, ул. Кипсала, 6а, Рига, LV-1048, Латвия

Получение информации о наличии трещин в исходном сырье, заготовках и изделиях из древесины необходимо для принятия решения о целях последующей ее обработки и эксплуатации. Способ диагностики трещин в древесине основан на измерении внутреннего трения. На подготовленные образцы натуральной и модифицированной прессованием древесины, выпиленные из стволовой части деревьев березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающих в Хлевенском Лесхозе, Липецкой обл. (52.184130, 39.110463, НУМ 157м), воздействовали в радиальном и тангенциальном направлениях ультразвуком (частота 24.5 кГц, экспозиция 0-20 минут, шаг 5 минут) и импульсным магнитным полем (напряженность – 0.3 Тл, экспозиция 0-2 минуты, шаг 0.5 минуты). Далее исследовали внутреннее трение образцов на экспериментальной установке методом измерения логарифмического декремента затухания на основе свободно-изгибных колебаний. При уровне значимости  $p=0.95$  определили абсолютные величины безразмерного коэффициента внутреннего трения  $Q^{-1}$ , как основного структурного параметра для образцов натуральной и модифицированной древесины: для влажности при наличии одной трещины  $Q^{-1}$  уменьшилось на 7.04% ( $D=0.08$ ), при наличии двух трещин – на 8.4% ( $D=0.15$ ), при наличии трех трещин – на 9.06% ( $D=0.15$ ); для ультразвука при наличии одной трещины  $Q^{-1}$  уменьшилось на 7.17% ( $D=0.05$ ), при наличии двух трещин – на 8.46% ( $D=0.05$ ), при наличии трех трещин – на 9.12% ( $D=0.09$ ); для импульсного магнитного поля при наличии одной трещины  $Q^{-1}$  уменьшилось на 7.14% ( $D=0.05$ ), при наличии двух трещин – на 8.39% ( $D=0.09$ ), при наличии трех трещин – на 9.02% ( $D=0.09$ ). При испытании образцов натуральной древесины и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth) получили асимптотическое уравнение аппроксимации зависимости уменьшения  $Q^{-1}$  от количества трещин, с величиной аппроксимации  $R^2=0.994$ . Исследование зависимости внутреннего трения от процесса трещинообразования в различных породах древесины обеспечивает подготовку следующего этапа - построение прототипа системы неразрушающего контроля дефектов.

**Ключевые слова:** внутреннее трение древесины, диагностика трещин в древесине, натуральная и модифицированная древесина, береза повислая, *Betula pendula* Roth, ультразвук, импульсное магнитное поле

**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:** Руссу, А. В. Трещинообразование натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth): эффект показателя внутреннего трения под влиянием внешних возмущений / А. В. Руссу, В. А. Шамаев, А. Зимелис // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 219–235. – Библиогр.: с. 231–234 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/15>.

Поступила 04.09.2023 Пересмотрена 12.11.2023. Принята 16.11.2023. Опубликована онлайн 30.11.2023

Article

## Crack formation in natural and pressure-modified silver birch (*Betula pendula* Roth) wood: the effect of the internal friction index under the influence of external disturbances

Alexander V. Russu<sup>1</sup>, [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-8525-0348>

Vladimir A. Shamaev<sup>1</sup> ✉, [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Andris Ziemelis, [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv)  <https://orcid.org/0000-0001-6919-9263>

<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>Technische Universitat Riga, Kipsalas iela, 6a, Centra rajons, LV-1048, Riga, Latvia

### Abstract

Obtaining information about the presence of cracks in raw materials, blanks and wood products is necessary to make a decision on the purposes of its subsequent processing and operation. The method for diagnosing cracks in wood is based on measuring internal friction. For prepared samples of natural and modified wood, sawn from the stem part of drooping birch (*Betula pendula* Roth) trees growing in Khlevensky Forestry, Lipetsk region. (52.184130, 39.110463, ASL 157m), exposed to radial and tangential directions with ultrasound (frequency 24.5 kHz, exposure 0-20 minutes, step 5 minutes) and pulsed magnetic field (strength - 0.3 T, exposure 0-2 minutes, step 0.5 minutes). Next, the internal friction of the samples was studied on an experimental setup by measuring the logarithmic damping decrement based on free-bending vibrations. The absolute values of the dimensionless coefficient of internal friction  $Q^{-1}$ , as the main structural parameter for samples of natural and modified wood, were obtained at a significance level of  $p=0.95$ : for humidity, in the presence of one crack,  $Q^{-1}$  decreased by 7.04% ( $D=0.08$ ), in the presence of two cracks - by 8.4% ( $D=0.15$ ), in the presence of three cracks - by 9.06% ( $D=0.15$ ); for ultrasound in the presence of one crack  $Q^{-1}$  decreased by 7.17% ( $D=0.05$ ), in the presence of two cracks - by 8.46% ( $D=0.05$ ), in the presence of three cracks - by 9.12% ( $D=0.09$ ); for a pulsed magnetic field in the presence of one crack  $Q^{-1}$  decreased by 7.14% ( $D=0.05$ ), in the presence of two cracks - by 8.39% ( $D=0.09$ ), in the presence of three cracks - by 9.02% ( $D=0.09$ ). When testing the samples of natural wood and pressure-modified drooping birch (*Betula pendula* Roth) wood, we obtained an asymptotic equation was obtained for approximating the dependence of the decrease in  $Q^{-1}$  on the number of cracks, with the approximation value  $R^2=0.994$ . The study of the dependence of internal friction on the process of crack formation in various types of wood provides preparation for the next stage - the construction of a prototype system for non-destructive testing of defects.

**Keywords:** internal friction of wood, diagnostics of cracks in wood, natural and modified wood, drooping birch (*Betula pendula* Roth), ultrasound, pulsed magnetic field

**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:** Russu A. V., Shamaev V. A., Ziemelis A. (2023). Crack formation in natural and pressure-modified silver birch (*Betula pendula* Roth) wood: the effect of the internal friction index under the influence of external disturbances. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 219-235 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/15>.

*Received* 04.09.2023. *Revised* 12.11.2023. *Accepted* 16.11.2023. *Published online* 30.11.2023.

### Введение

Внутреннее трение вызвано силами сопротивления, которые возникают при столкновении частиц вещества в процессе движения друг относительно друга. Это связано с взаимодействием молекул и атомов между собой, а также их колебательными и поворотными движениями. Например, при движении физического тела внутри газовой или жидкой среды возникает внутреннее трение, которое известно как вязкость. По этой причине возникают локальный разогрев тела и потери энергии в виде диссипативных процессов.

Авторы экспериментировали с образцами натуральной и модифицированной древесины, применяя специально разработанный прибор, который формирует затухающие изгибные колебания, вызывающие внутреннее трение в материале.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что метод внутреннего трения может рассматриваться как структурно чувствительный метод для выявления трещин в древесине.

Хорошо известный факт, что некоторые трещины в древесине достаточно компактны и закрыты, а видимым образом проявляются только как тонкие слабозаметные линии, не очень глубокие, сильно схожие с древесными волокнами. Это осложняет процесс их диагностики. Применяя установку внутреннего трения, удалось идентифицировать как крупные, так и менее заметные трещины. Также было замечено, что внутреннее трение в древесине зависит от ее состава и структуры.

Данные исследования могут быть полезны для разработки новых методов неразрушающего контроля, а также для оценки механических свойств древесины. Например, применение механической спектроскопии тел на основе метода внутреннего трения поможет выявить трещины в древесине до их возникновения, чтобы предотвратить разрушение материала.

Появление трещин в древесине причиняет ей вред, который приводит к разрушительным последствиям. Во-первых, трещины снижают прочность материала, уменьшая его надежность и делая невозможным его использование в различных конструкциях. Во-вторых, трещины могут стать каналами проникновения влаги в древесину, а значит, также способствуют разрушению материала, добавок провоцируя процессы гниения или плесени. Пространство трещин может стать местом обитания термитов или древоточцев, которые наносят огромный урон материалу, делая его негодным для дальнейшего использования. Такие внешние факторы как температура и влажность приводят к уширению трещин, поэтому также способствуют разрушению древесины. Кроме того, наличие трещин в древесине может резко снижать эстетическое свойства материала, который используется в отделке или декоративных целях, например, при производстве мебели и полов. По этой причине выбор качественной древесины, без трещин крайне необходим для последующей ее сохранности, эксплуатации и увеличения срока службы [1].

В некоторых случаях вред, причиняемый трещинами, может быть обращен в пользу, то есть трещины в древесине могут иметь различное применение. Например, декоративное применение: трещины могут придать древесине уникальный и неповторимый внешний вид, обогащая её текстуру и структуру. Такие доски могут использоваться для создания мебели, дверей, подоконников, рам и других элементов интерьера. Трещины в древесине помогают обеспечить решение эстетических задач - выделить контуры и формы различных деталей, делая их более видимыми и привлекательными по аналогии с кракелюром [2]. Трещины могут быть заполнены специальными смолами или эпоксидными смолами, создавая интересные эффекты и обеспечивая дополнительную прочность изделию.

Трещины могут быть выделены и подчеркнуты при помощи специальных отделочных техник, создавая впечатление, что древесина уже длительное время использовалась и подверглась естественному износу, таким образом формируя эффект "старой" или "устаревшей" древесины. Заполнение небольших трещин в древесине различными материалами, такими как деревянные шпатлевки или эпоксидные смолы обеспечивает восстановление прочности и эстетического вида поврежденной древесины. В некоторых случаях трещины в древесине желательны для создания особенного звучания музыкального инструмента. В таких случаях, трещины могут быть профессионально очищены и зафиксированы для сохранения исключительного звукового эффекта. Кроме того, металлизация древесины оловом и висмутом при помощи микроволновой обработки позволила эффективно использовать трещины для повышения качества и потребительских свойств древесного композита [3]. И это лишь некоторые из возможных применений трещин в древесине. В зависимости от конкретных требований и творческого видения, возможны и другие варианты использования.

Образование трещин в древесине и композитах на ее основе вызвано разнообразными причинами. Прежде всего это связано с наследуемостью растрескивания [4]. Также при сушке древесины или композитов на ее основе может происходить усадка материала, что приводит к появлению трещин [5]. Древесина и композитные материалы на ее основе способны поглощать влагу из окружающей среды. При длительном воздействии влаги материал разбухает и сжимается, что приводит к образованию трещин [6–8]. Древесина и композиты на ее основе могут подвергаться механическим нагрузкам, таким как удары, сжатие, растяжение [9]. А также материалы могут оказаться под воздействием условий окружающей среды с учетом формирования малоциклового усталости – все это служит причиной образования трещин и последующего разрушения материала [10; 11]. Резкие изменения температуры также могут вызывать термические напряжения в древесине и композитах на ее основе, что приводит к образованию трещин. Для древесных композитов неправильное смешивание компонен-

тов, некачественные материалы или неправильная технология производства также могут привести к образованию трещин. Некоторые деревья имеют врожденные дефекты, такие как внутренние напряжения, содержание смолы и другие физические недостатки, которые приводят к образованию трещин. Кроме того, на образование трещин могут одновременно повлиять различные факторы, в комплексе. К примеру одновременное влияние механической нагрузки и влажности интенсифицирует процесс образования трещин в древесине.

Для описания трещин и процесса трещинообразования уже существует большой выбор различных моделей [12]. Это связано с тем обстоятельством, что для древесины характерен сложный микроструктурный состав и очень специфическая микромеханика взаимодействий [13].

В древесиноведении сложился определенный набор методов исследования трещин. Методики разрушающих методов исследования основаны на определении темпа высвобождаемой энергии деформации, а также уровня интенсивности напряжения [14]. В нашем случае интерес представляют неразрушающие методы контроля.

Самый простой из методов неразрушающего контроля, не требующий специального оборудования и дополнительной подготовки, является метод визуального контроля. Визуальный контроль состоит в определении состоянии внешнего вида древесины, в осмотре трещин, оценки их геометрических параметров и места расположения. Визуальное изучение трещин при поддержке метода скоростной фотосъемки помогает определить трещины на поверхности тела, при этом эти данные непосредственно служат для принятия решения о последующих мерах, если они необходимы [15;16].

Следует отметить, что метод визуальной оценки в сравнении с ультразвуковым или радиографическим методом наиболее дешевый [17]. Но в тоже время визуальная оценка имеет ограниченную область наблюдения того, что на поверхности и не эффективно для случая, если трещина глубоко внутри объекта, либо осмотр происходит в затемненных условиях и труднодоступных местах. Поэтому для трещин в глубине, а также малозаметные

трещины требуют наличия других более сложных методов исследования.

К более сложным методам исследования следует отнести акустические методы, отличительная особенность которых состоит в том, что ударным тестером оценивают звукоотражение и реверберацию в древесине для определения локализации и характера трещин [18]. Применение акустических методов позволяет производить скоростное обследование значительных объемов древесины с целью диагностики трещин, их геометрических особенностей на ранних этапах их образования [19; 20]. Однако акустические методы ограничены формой и размерами исследуемых образцов древесины и локальной чувствительностью к трещинам, располагающимся на значительной глубине. Кроме того, внешние шумы увеличивают ошибочность получаемых данных. Решением проблемы является использование дорогостоящего оборудования.

Еще один метод исследования трещин – это сканирование при помощи ультразвука, которое помогает оценить глубину нахождения трещин и их геометрические параметры [21]. Ультразвуковой дефектоскоп обеспечивает визуализирование трещин при помощи пучка звуковой волны. С помощью данного метода в короткие сроки диагностируют трещины и их параметры в материале с высокой точностью, не используя повреждение объекта при проведении исследования. Данный метод может быть применен в работе в режиме реального времени. Однако при таком типе диагностики трещин появляются свои трудности – значительно усложняется процедура интерпретации, то есть для качественного применения метода требуются определенные навыки и опыт. Кроме того, проникающая способность ультразвука ограничена определенной глубиной, следовательно, и сам метод ограничен определенной областью сканирования. Также качество сканирования тесно взаимосвязано с состоянием поверхности исследуемого объекта. Ввиду того, что используемое оборудование может быть достаточно дорогим данный метод не всегда доступен для некоторых предприятий или организаций.

Метод термографии основан на другом физическом принципе: применение высокочувстви-

тельной инфракрасной камеры позволяет диагностировать трещины, поскольку величина температуры внутри трещины отличается от температуры внешней древесины. Это также неразрушающий метод контроля, который очень ценен для диагностики скрытых трещин [22]. Метод обладает большой производительностью и высокой точностью, но сравнительно небольшой глубиной проникновения, а его эффективность тесно связана с величиной разницы температур между трещиной и поверхностью древесины, что не всегда осуществимо. На конечный результат диагностики также могут накладываться искажения такие внешние факторы как температура и влажность, и такое свойство объекта как неровность поверхности.

Метод рентгеновской диагностики основан на применении пучков рентгеновских лучей для диагностики трещин в древесине [23]. Данный метод позволяет диагностировать видимые и малозаметные трещины, их локализацию и размеры как для малых объектов, так и для больших. Но наиболее существенные недостатки метода – дорогостоящее оборудование и работа с источником ионизирующей радиации, причиняющей вред здоровью. В этом случае необходимы особые меры предосторожности и дополнительные средства для защиты операторов. Эффективность рентгеновской диагностики зависит от большой плотности древесины и содержания металлических включений, которые уменьшают результативность обнаружения и оценки трещин.

Таким образом, каждый из упомянутых методов обладает преимуществами и недостатками в работе, по этой причине используют комбинацию из нескольких методов, и разработка новых неразрушающих методов диагностики трещин в древесине представляет большой практический интерес.

Существует еще одна группа методов неразрушающего изучения материалов для получения информации о свойствах и выявления дефектов структуры – это методы исследования внутреннего трения.

В основу метода внутреннего трения положен принцип возбуждения механических затухающих колебаний в объекте. Данный метод может быть использован в процессе подготовки материала

и его эксплуатации, поскольку обеспечивает обнаружение микротрещин и дефектов в теле с высокой точностью в режиме реального времени и при этом не требуется дорогостоящее оборудование.

Представляет практический интерес наиболее распространенная разновидность метода внутреннего трения – метод изгибных свободнозатухающих колебаний при котором величина внутреннего трения определяется по логарифмическому декременту затухания. Метод изгибных колебаний допускает масштабирование и корректировку для учета воздействия влажности и температуры. В процессе эксплуатации установки определения внутреннего трения для повышения эффективности интерпретации результатов оператор может быть снабжен пополняемой базой соответствующих данных для корректной оценки трещин и повреждений.

Еще одна разновидность методов внутреннего трения получила название – резонансные, поскольку они основаны на измерении частоты собственных колебаний материала при возбуждении внешней силой. Для оценки внутреннего трения учитывают изменение резонансной частоты и логарифмического декремента затухания. Резонансные методы обычно используют при частотах колебаний порядка нескольких сотен килогерц. В следующем мегагерцовом диапазоне частот используют импульсный ультразвуковой метод, который основан на измерении ослабления амплитуды ультразвукового импульса при его прохождении от одного конца образца до противоположного.

Однако общий недостаток всех резонансных методов исследования внутреннего трения состоит в ограниченности частотного диапазона измерения внутреннего трения на одном и том же образце. А применение ультразвука для определения внутреннего трения обладает еще одним недостатком – в этом случае происходит диффузионное рассеяние на неоднородностях структуры материала. По этой причине представляется перспективным развитие метода внутреннего трения для исследования древесины и композитов на ее основе, используя свободно затухающие, например, изгибные колебания.

Цель работы – исследовать теоретическую и эмпирическую взаимосвязь эффектов влажности,

ультразвука, импульсного магнитного поля с показателем внутреннего трения для натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth), обладающей дефектами трещин.

### Материалы и методы

Работа является теоретико-эмпирическим исследованием.

#### *Предмет и объект исследования*

Объектом исследования явились образцы натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth). Заготовки для получения образцов производились в Хлевенском Лесхозе Липецкой обл. (52.184130, 39.110463, НУМ 157м).

Предмет исследования – явление внутреннего трения натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth) под влиянием влажности, ультразвука и импульсного магнитного поля при отсутствии и наличии трещин в натуральной и модифицированной древесине.

Сырьем для получения модифицированной древесины марки «Дестам», которая представляет собой модифицированную прессованием древесину березы повислой (*Betula pendula* Roth) является отобранный лесоматериал березы диаметром 190мм и длиной 1м, без гнили, затем заготовки пропитывают, прессуют, высушивают и фрезеруют до необходимых размеров [24; 25]. Образцы натуральной древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth) и модифицированной прессованием древесины марки «Дестам» (табл. 1) для испытания должны иметь прямоугольную форму и быть одинакового размера 500х42х2,5мм.

При подготовке образцов натуральной и модифицированной прессованием древесины для проведения эксперимента осуществляли контроль качества. Не допускались образцы с трещинами, сучками, гнилью и другими дефектами.

Для проведения эксперимента вырезали образцы следующих геометрических размеров: длина 500 мм (свободная длина 400 мм), ширина 42 мм, толщина 2,5 мм. Образцы предварительно взвешивали, и определяли их плотность. Минимальное количество образцов должно быть не менее 3 шт.

Эксперимент проводили с образцами древесины влажностью 12%.

Таблица 1  
Некоторые механические свойства используемых в исследовании образцов

Table 1  
Mechanical properties types of wood, used this study

Материал образца Sample material	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>   Density, kg/m <sup>3</sup>	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>   Impact strength, kJ/m <sup>2</sup>	
		Влажность Moisture	
		12%	30%
Натуральная древесина березы повислой ( <i>B. pendula</i> Roth) Birch	550	9,3	7,8
Модифицированная древесина марки «Дестам»   Destam (birch modified)	800	10,2	9,2

Источник: Леонтьев Л. Л. Древесиноведение и лесное товароведение: учеб. для вузов / Л. Л. Леонтьев. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 416 с. - ISBN 978-5-507-44386-4. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. - URL: <https://e.lanbook.com/book/226460> (дата обращения: 01.09.2023).

Source: Leontiev L.L. Wood science and forest goods management: a textbook for universities. - 4<sup>th</sup> ed., stereotypical. - St. Petersburg : Lan, 2022. - 416 p. - ISBN 978-5-507-44386-4. - URL: <https://e.lanbook.com/book/226460> (01.09.2023).

#### Теоретические предпосылки

Для оценки внутреннего трения  $Q^{-1}$  в древесине образцов использован метод логарифмического декремента затухания на основе свободно-изгибных колебаний.

В работе за основу взято измерение двух последовательных амплитуд колебаний. При определении внутреннего трения методом свободно затухающих изгибных колебаний используют соотношение

$$Q^{-1} = \delta / \pi = \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{A_n}{A_{n+1}} \right), \quad (1)$$

где  $Q^{-1}$  – внутреннее трение,  
 $\delta$  – логарифмический декремент затухания,  
 $A_n$  и  $A_{n+1}$  – амплитуды колебаний соседних периодов колебаний.

Величина внутреннего трения и логарифмический декремент затухания могут быть равноценно использованы для описания экспериментальных зависимостей, получаемых методом свободно-изгибных колебаний.

Величина логарифмического декремента затухания  $\delta$  зависит от таких факторов, как направление действия напряжений относительно волокон (вдоль или поперек), породы древесины, микро- и макроструктуры, влажности, температуры, наличия дефектов.

#### – Дизайн эксперимента или сбор данных

Температура и влажность рабочего помещения 22 °С и 68%, что удовлетворяет требованиям для проведения эксперимента

Для каждого материала подготавливают бездефектные образцы и образцы с дефектами трещин в количестве – 1, 2, 3 трещины, получаемые расколом. Внешний вид показан на рис. 1. Для повторяемости результатов используется не менее 3 одинаковых образцов для каждого типа исследуемого материала.

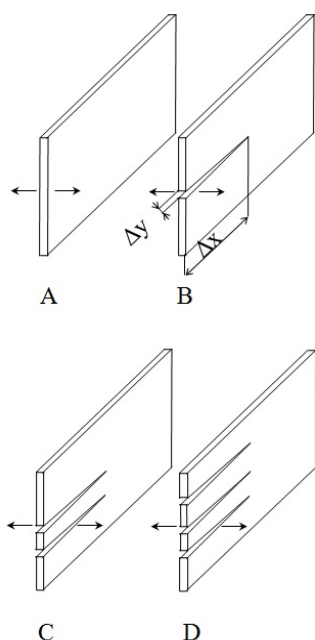


Рисунок 1. Внешний вид образцов:

A – без дефектов, B - с одной трещиной, C - с двумя трещинами, D - с тремя трещинами

Figure 1. Appearance of samples:

A - without defects, B - with one crack, C - with two cracks, D - with three cracks

Глубина каждой трещины  $\Delta x=50$  мм, ширина трещины  $\Delta y=0,5$  мм.

Перед испытанием образцов производят их соответствующую обработку для достижения заданного уровня влажности (экспозиция 0, 10, 20, 30, 40%), отдельно при влажности 10% производят ультразвуковую обработку (экспозиция 0, 5, 10, 15, 20 мин), также при влажности 10% производят обработку импульсным магнитным полем (экспозиция 0; 0,5; 1; 1,5; 2 мин). Внешний вид и параметры установок приведены на рис. 2 и 3, и в табл. 2 и 3 соответственно.



Рисунок 2. Установка ультразвуковой обработки:

1 – образец; 2 – ванна;

3 – ультразвуковой излучатель

Figure 2. Ultrasonic treatment unit:

1 – sample; 2 – bath; 3 – ultrasonic emitter

Источник: собственная фотография авторов

Source: own photo

Таблица 2

Технические характеристики ультразвуковой ванны

Table 2

Specifications of ultrasonic cleaner

Наименование   Name	Ед. измер.   Unit meas.	Значение   Meaning
Модель   Model		УЗК 1,3   USK 1,3
Размеры рабочей емкости   Working container dimensions	м   m	0,12x0,11x0,1
Рабочий объем   Working volume	м <sup>3</sup>   m <sup>3</sup>	1,3·10 <sup>-3</sup>
Рабочая частота   Operating frequency	кГц   kHz	24,0 ± 7,5%

Ультразвуковая мощность   Ultrasonic power	Вт   W	80
Напряжение питания   Supply voltage	В   V Гц   Hz	220 50
Установка времени таймера   Timer setting	с   s	1-900 на энкопере   on encoder
Температура жидкости   Liquid temperature	С°	20-105
Панель управления   Control panel		аналоговая   analog
Корпус   Housing		нержавеющая сталь   stainless steel

Источник: ООО «Спецмаш», РФ  
Source: LLC Spetsmash, RF

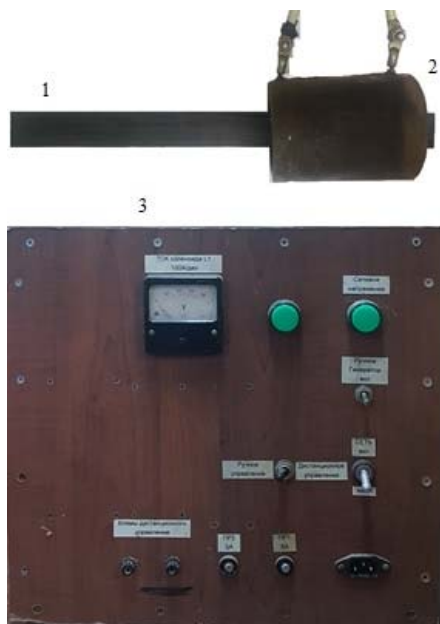


Рисунок 3. Установка импульсно-магнитной обработки: 1 – образец; 2 – соленоид; 3 – панель управления

Figure 3. Installation of pulsed magnetic processing: 1 – sample; 2 – solenoid; 3 – control panel

Источник: собственная фотография авторов  
Source: own photo

Таблица 3

Технические характеристики генератора импульсного магнитного поля

Table 3

Generator Specifications pulsed magnetic field

Наименование   Name	Ед. измер.   Unit meas.	Значение   Meaning
Размер заготовок   Work piece size	м   m	0,05x0,05x0,1
Количество заготовок   Number of blanks	шт.   PCS	1
Максимальная индукция магнитного поля   Maximum magnetic field induction	Тл   T	0,3
Сила тока в импульсе   Pulse current	кА   kA	2
Число импульсов при обработке   Number of pulses during processing		3000/6000
Частота подачи импульсов   Pulse frequency	Гц   Hz	100
Длительность импульса   Pulse duration	10 <sup>-6</sup> с   s	10
Форма импульса   Pulse shape		треугольная   triangular
Длительность обработки образцов   Sample processing time	с   s	30/60
Индуктивность соленоида   Solenoid inductance	10 <sup>-6</sup> Гн.   10 <sup>-6</sup> H	5-10
Плотность намотки соленоида   Solenoid winding density	витков/метр   turns/meter	180
Напряжение однофазной питающей сети   Single-phase mains voltage	В   V	220
Потребляемая мощность генератором   Power consumption of the generator	Вт   W	1000
Габариты генератора   Generator dimensions	м   m	0,41x0,41x0,23
Масса генератора   Generator weight	кг   kg	15

Источник: ВГЛТУ, Лаборатория физико-механических измерений древесины, РФ

Source: VSUFT, Laboratory of Physical and Mechanical Measurements of Wood, RF

Образцы по одному закрепляют в испытательном устройстве, чтобы они могли свободно колебаться и обеспечивать безопасность и точность



результатов. Внешний вид испытательного устройства показан на рис. 4.



Рисунок 4. Установка для измерения амплитуды изгибных колебаний:

1 - персональный компьютер, 2 - стабилизатор напряжения, 3 - штатив, 4 - электромагнит, 5 - цифровой динамометр, 6 - образец древесины, 7 - трехпозиционная оснастка, 8 - трансформатор, 9 - реостат, 10 - амперметр, 11 - защитное заземление, 12 - рабочий стол

Figure 4. Installation for measuring the amplitude of flexural vibrations:

1 - personal computer, 2 - voltage stabilizer, 3 - tripod, 4 - electromagnet, 5 - digital dynamometer, 6 - wood sample, 7 - three-position equipment, 8 - transformer, 9 - rheostat, 10 - ammeter, 11 - protective earth, 12 - desktop

Источник: собственная фотография автора  
Source: own photo

Возбуждение изгибных затухающих колебаний обеспечивают при помощи электромагнита (рис. 4, поз. 4), который воздействует на фольгу из сплава с большой коэрцитивной силой (пермаллой), закрепленной на свободном конце исследуемого образца (рис. 4, поз. 6). Величина амплитуды колебаний измеряется тензодатчиком цифрового динамометра (рис. 4, поз. 5) и задается регулировкой величиной электрического тока в обмотках электромагнита реостатом (рис. 4, поз. 9).

Измерение амплитуды и частоты колебаний. С помощью цифрового динамометра производится измерение амплитуды колебаний и времени, затраченное на несколько полных колебаний каждого образца (рис. 4, поз. 5). Результаты по шине данных, связывающую измерительную систему с ком-

пьютером (рис. 4, поз. 1), выводятся на экран монитора и могут быть представлены в виде соответствующих таблиц и графиков.

Расчет коэффициента внутреннего трения  $Q^{-1}$  производят с использованием формулы (1).

– Анализ данных (Data analysis)

Для оценки степени изменчивости данных используется общеизвестная статистическая характеристика – величина дисперсии  $D$ .

Для определения достоверности аппроксимации используют коэффициент детерминации  $R^2$  (R-SQUARED):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^b - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

где  $N$  – общее количество экспериментальных точек,  $y_i^b$  – теоретическое значение величины внутреннего трения,  $y_i$  – экспериментальное значение величины внутреннего трения,  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значение величины внутреннего трения.

Чем ближе значение  $R^2$  к единице, тем лучше выбранная функция модели соответствует фактическим данным наблюдения.

Все расчеты проведены в программе Excel 2003.

### Результаты и обсуждение

На рис. 5, 6 и 7 приведены графики испытаний различных образцов натуральной и модифицированной прессованием древесины для выявления зависимости внутреннего трения от количества одинаковых трещин. Для наглядности экспериментальные точки соединены соответствующими аппроксимирующими линиями: для бездефектных случаев – сплошными, для дефектных – прерывистыми.

Экспериментальные данные показали, что в условиях влияния влажности в среднем  $Q^{-1}$  уменьшается для одной трещины в образце на величину 7,04 % ( $D=0,08$ ), для двух трещин – на 8,4 % ( $D=0,15$ ), для трех – на 9,06 % ( $D=0,15$ ).

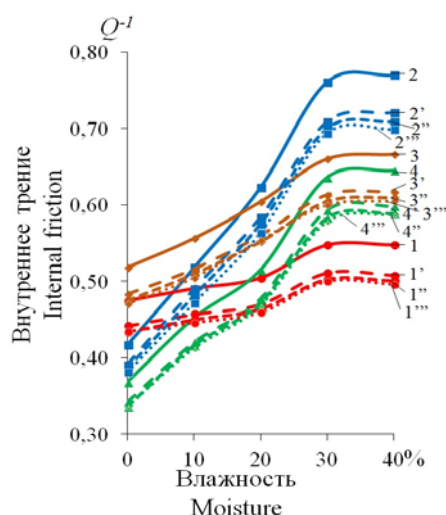


Рисунок 5. Влияние влажности древесины на внутреннее трение: 1 – «Дестам», радиальное направление, без дефектов, 1' – «Дестам», радиальное направление, одна трещина, 1'' – «Дестам», радиальное направление, две трещины, 1''' – «Дестам», радиальное направление, три трещины, 2 – «Дестам», тангенциальное направление, без дефектов, 2' – «Дестам», тангенциальное направление, одна трещина, 2'' – «Дестам», тангенциальное направление, две трещины, 2''' – «Дестам», тангенциальное направление, три трещины, 3 – натуральная береза, радиальное направление, без дефектов, 3' – натуральная береза, радиальное направление, одна трещина, 3'' – натуральная береза, радиальное направление, две трещины, 3''' – натуральная береза, радиальное направление, три трещины 4 – натуральная береза, тангенциальное направление, без дефектов, 4' – натуральная береза, тангенциальное направление, одна трещина, 4'' – натуральная береза, тангенциальное направление, две трещины, 4''' – натуральная береза, тангенциальное направление, три трещины

Figure 5. Influence of wood moisture on internal friction: 1 - "Destam", radial direction, no defects, 1' - "Destam", radial direction, one crack, 1'' - "Destam", radial direction, two cracks, 1''' - "Destam", radial direction, three cracks, 2 - "Destam", tangential direction, without defects, 2' - "Destam", tangential direction, one crack, 2'' - "Destam", tangential direction, two cracks, 2''' – Destam, tangential direction, three cracks, 3 – natural birch, radial direction, without defects, 3' – natural birch, radial direction, one crack, 3'' – natural birch, radial direction, two cracks, 3''' – natural birch, radial direction, three cracks 4 – natural birch, tangential direction, without defects, 4' – natural birch, tangential direction, one crack, 4'' – natural birch, tangential direction, two cracks, 4''' natural birch, tangential, three cracks

Источник: собственные экспериментальные данные авторов / Source: authors' own experimental data

В условиях влияния ультразвука в среднем  $Q^{-1}$  уменьшается для одной трещины в образце на величину 7,17 % ( $D=0,05$ ), для двух трещин – на 8,46 % ( $D=0,05$ ), для трех – на 9,12 % ( $D=0,09$ ).

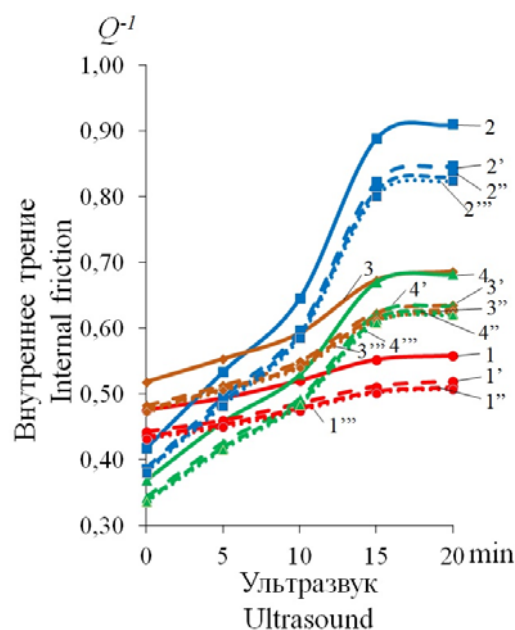


Рисунок 6. Влияние ультразвуковой обработки древесины на внутреннее трение: 1 – «Дестам», радиальное направление, без дефектов, 1' – «Дестам», радиальное направление, одна трещина, 1'' – «Дестам», радиальное направление, две трещины, 1''' – «Дестам», радиальное направление, три трещины, 2 – «Дестам», тангенциальное направление, без дефектов, 2' – «Дестам», тангенциальное направление, одна трещина, 2'' – «Дестам», тангенциальное направление, две трещины, 2''' – «Дестам», тангенциальное направление, три трещины, 3 – натуральная береза, радиальное направление, без дефектов, 3' – натуральная береза, радиальное направление, одна трещина, 3'' – натуральная береза, радиальное направление, две трещины, 3''' – натуральная береза, радиальное направление, три трещины 4 – натуральная береза, тангенциальное направление, без дефектов, 4' – натуральная береза, тангенциальное направление, одна трещина, 4'' – натуральная береза, тангенциальное направление, две трещины, 4''' – натуральная береза, тангенциальное направление, три трещины

Figure 6. Influence of ultrasonic wood treatment on internal friction: 1 - "Destam", radial direction, no defects, 1' - "Destam", radial direction, one crack, 1'' - "Destam", radial direction, two cracks, 1''' - "Destam", radial direction, three cracks, 2 - "Destam", tangential direction, without defects, 2' - "Destam", tangential direction, one crack, 2'' - "Destam", tangential direction, two cracks, 2''' – Destam, tangential direction, three cracks, 3 – natural birch, radial direction, without defects, 3' – natural birch, radial direction, one crack, 3'' – natural birch, radial direction, two cracks, 3''' – natural birch, radial direction, three cracks 4 – natural birch, tangential direction, without defects, 4' – natural birch, tangential direction, one crack, 4'' – natural birch, tangential direction, two cracks, 4''' – natural birch, tangential, three cracks

direction, without defects, 3' – natural birch, radial direction, one crack, 3'' – natural birch, radial direction, two cracks, 3''' – natural birch, radial direction, three cracks 4 – natural birch, tangential direction, without defects, 4' – natural birch, tangential direction, one crack, 4'' – natural birch, tangential direction, two cracks, 4''' natural birch, tangential, three cracks

Источник: собственные экспериментальные данные авторов

Source: authors' own experimental data

В условиях влияния импульсного магнитного поля  $Q^{-1}$  уменьшается для одной трещины в образце на величину 7,14% ( $D=0,05$ ), для двух трещин – на 8,39% ( $D=0,09$ ), для трех – на 9,02% ( $D=0,09$ ).

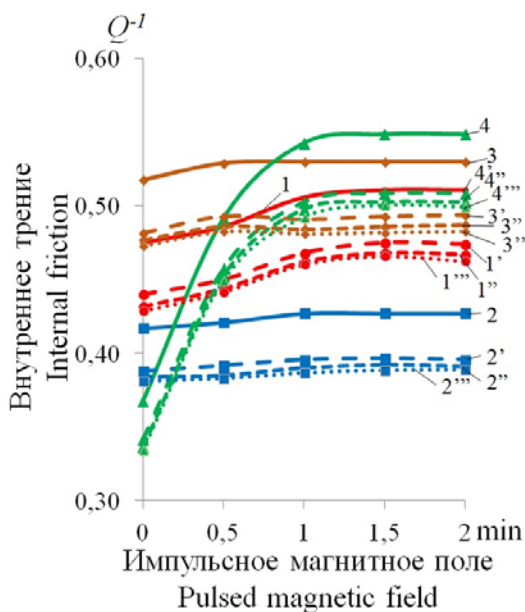


Рисунок 7. Влияние импульсной магнитной обработки древесины на внутреннее трение: 1 – «Дестам», радиальное направление, без дефектов, 1' – «Дестам», радиальное направление, одна трещина, 1'' – «Дестам», радиальное направление, две трещины, 1''' – «Дестам», радиальное направление, три трещины, 2 – «Дестам», тангенциальное направление, без дефектов, 2' – «Дестам», тангенциальное направление, одна трещина, 2'' – «Дестам», тангенциальное направление, две трещины, 2''' – «Дестам», тангенциальное направление, три трещины, 3 – натуральная береза, радиальное направление, без дефектов, 3' – натуральная береза, радиальное направление, одна трещина, 3'' – натуральная береза, радиальное направление, две трещины, 3''' – натуральная береза, радиальное направление, три трещины 4 – натуральная береза, тангенциальное направление, без дефектов, 4' – натуральная береза, тангенциальное направление, одна трещина, 4'' – натуральная береза, тангенциальное направление, две трещины, 4''' – натураль-

ная береза, тангенциальное направление, три трещины

Figure 7. Influence of pulsed magnetic wood treatment on internal friction: 1 - "Destam", radial direction, no defects, 1' - "Destam", radial direction, one crack, 1'' - "Destam", radial direction, two cracks, 1''' - "Destam", radial direction, three cracks, 2 - "Destam", tangential direction, without defects, 2' - "Destam", tangential direction, one crack, 2'' - "Destam", tangential direction, two cracks, 2''' – Destam, tangential direction, three cracks, 3 – natural birch, radial direction, without defects, 3' – natural birch, radial direction, one crack, 3'' – natural birch, radial direction, two cracks, 3''' – natural birch, radial direction, three cracks 4 – natural birch, tangential direction, without defects, 4' – natural birch, tangential direction, one crack, 4'' – natural birch, tangential direction, two cracks, 4''' natural birch, tangential, three cracks

Источник: собственные экспериментальные данные авторов / Source: authors' own experimental data

Произведя усреднение по проценту отклонения для каждого дефектного варианта, получаем следующие значения: для одного дефекта снижение величины внутреннего трения  $Q^{-1}$  в среднем составляет – 7,12% ( $D=0,13$ ), для двух дефектов – 8,42% ( $D=0,11$ ), для трех дефектов – 9,07% ( $D=0,09$ ). Это можно отобразить соответствующим графиком асимптоты (рис. 8).

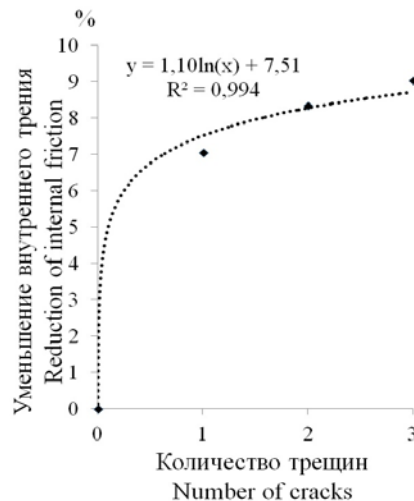


Рисунок 8. Асимптотическое уменьшение внутреннего трения в натуральной и модифицированной прессованной древесине в зависимости от количества трещин

Figure 8. Asymptotic decrease in internal friction in natural and modified wood depending on the number of cracks

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

На рис. 8 указано уравнение кривой асимптотического уменьшения внутреннего трения в зависимости от числа дефектов:

$$y = 1,10 \ln(x) + 7,51, \quad (3)$$

где  $x$  – количество трещин в образце,  
 $y$  – проценты уменьшения  $Q^{-1}$ ,

Уравнение (3) обеспечивает высокую степень аппроксимации  $R^2=0,994$ . Следовательно, данное уравнение с достаточной точностью позволяет прогнозировать величину уменьшения внутреннего трения в зависимости от числа трещин в образце.

### Выводы

Методом внутреннего трения на основе изгибных колебаний были определены величины внутреннего трения для натуральной и модифицированной прессованием древесины при отсутствии дефектов, а также для случаев с одним, двумя, тремя трещинами с учетом влияния влажности, ультразвукового поля и импульсного магнитного поля. Экспериментальные данные показали, что в среднем в условиях влияния влажности  $Q^{-1}$  уменьшается для одной трещины в образце на величину

7,04%, для двух трещин – на 8,4%, для трех – на 9,06%, в условиях влияния ультразвука для одной трещины в образце на величину 7,17%, для двух трещин – на 8,46%, для трех – на 9,12%, в условиях влияния импульсного магнитного поля для одной трещины в образце на величину 7,14%, для двух трещин – на 8,39%, для трех – на 9,02%.

На основании средних значений величины уменьшения внутреннего трения в зависимости от числа трещин получено уравнение асимптоты  $y=1,10\ln(x)+7,51$  с высокой степенью аппроксимации  $R^2=0,994$ , позволяющее прогнозировать изменение величины внутреннего трения с учетом роста числа трещин в образце из натуральной или модифицированной прессованием древесины в радиальном и тангенциальном направлениях.

Представляет интерес дальнейшее исследование зависимости внутреннего трения от процесса трещинообразования в различных породах древесины, особенно обладающих большой плотностью, для построения прототипа системы дефектоскопии на основе измерения внутреннего трения.

### Список литературы

1. Dahle S., Pilko M., Žigon J., Zaplotnik R., Petrič M., Pavlič M. An open-source surface barrier discharge plasma pretreatment for reduced cracking of outdoor wood coatings. *Cellulose*. 2021; 28(12): 8055-8076. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04014-2>
2. Abdollahzadeh Jamalabadi M.Y. Optimal rectangular crack pattern based on constructal, fracture saturation, and energy minimization theories for painting on wood. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022; 160: 112242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112242>
3. Chai Yuan, Tao Xin, Liang Shanqing, Fu Feng Preparation and property characterization of crack-filled type microwave puffed wood based metal composites. 2021; 43: 118-125. DOI: <http://j.bjfu.edu.cn/article/doi/10.12171/j.1000-1522.20210209>
4. Zeltiņš P., Katrevičs J., Gailis A., Maaten T., Bāders E., Jansons Ā. Effect of Stem Diameter, Genetics, and Wood Properties on Stem Cracking in Norway Spruce. *Forests*. 2018; 9(9): 546. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9090546>
5. Mezui E.N., Nziengui C.F.P., Pitti R.M., Ikogou S., Ango S.E., Talla P.K. Strain and cracks investigations on tropical green wood slices under natural drying: experimental and numerical approaches. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2022; 81(1): 187-207. DOI: [10.1007/s00107-022-01881-9](https://doi.org/10.1007/s00107-022-01881-9)
6. Fu Z., Chen J., Zhang Y., Xie F., Lu Y. Review on Wood Deformation and Cracking during Moisture Loss. *Polymers*. 2023; 15(15): 3295. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15153295>
7. Botter-Kuisch H.P., Van den Bulcke J., Baetens J.M., Van Acker J. Cracking the code: real-time monitoring of wood drying and the occurrence of cracks. *Wood Science and Technology*. 2020; 54(4): 1029-1049. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01200-6>

8. He J., She Y., Li M., Cai G., Hu B. Experimental Study on the Crack Evolution Pattern of Pine Wood with Different Moisture Content. *Scholars Journal of Engineering and Technology*. 2022; 10(6): 102-110. DOI: <https://doi.org/10.36347/sjet.2022.v10i06.002>
9. Christoforo A.L., Penteado L.D., Camargo M.V. de, Arroyo F.N., Santos H.F. dos, Dias A.M.P.G., Lahr F.A.R. Estimative of Wood Strength in the Tensile Perpendicular to the Grain by the Cracking Strength. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4201159>
10. Zhang R., Taylor A., Charalambides M., Balint D., Young C., Barbera D., Blades N. A Numerical Model for Predicting the Time for Crack Initiation in Wood Panel Paintings Under Low-Cycle Environmentally Induced Fatigue. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4295737>
11. Autengruber M., Lukacevic M., Gröstlinger C., Füssl J. Finite-element-based prediction of moisture-induced crack patterns for cross sections of solid wood and glued laminated timber exposed to a realistic climate condition. *Construction and Building Materials*. 2021; 271: 121775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121775>
12. Ostapska K., Malo K.A. Crack path tracking using DIC and XFEM modelling of mixed-mode fracture in wood. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021; 112: 102896. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102896>
13. Supriatna D., Yin B., Konopka D., Kaliske M. An anisotropic phase-field approach accounting for mixed fracture modes in wood structures within the Representative Crack Element framework. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022; 269: 108514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108514>
14. Zizhen G., Gong M., Li L., Mohammadi M. An exploratory study on mixed-mode fracture and strain distribution near a crack tip of adhesively-laminated wood specimens using the modified arcon fixture and digital image correlation. *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*. 2023: 111-118. DOI: <https://doi.org/10.52202/069179-0015>
15. Carlsson J., Isaksson P. Dynamic crack propagation in wood fibre composites analysed by high speed photography and a dynamic phase field model. *International Journal of Solids and Structures*. 2018; 144-145: 78-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.04.015>
16. Lin Y., Xu Z., Chen D., Ai Z., Qiu Y., Yuan Y. Wood Crack Detection Based on Data-Driven Semantic Segmentation Network. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2023; 10(6): 1510-1512. DOI: <https://doi.org/10.1109/JAS.2023.123357>
17. Cao X., Li G. An Effective Method of Wood Crack Trace and Quantity Detection Based on Digital Image Processing Technology. 2021 13th International Conference on Machine Learning and Computing: ICMLC 2021. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. 2021; 304-309. DOI: <https://doi.org/10.1145/3457682.3457728>
18. Huang C., Li M., Fang S., Zhao Y., Mao F. Research on the effect of wood surface cracks on propagation characteristics and energy attenuation of longitudinal acoustic emission. *Wood Research*. 2022; 67(5): 744-759. DOI: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.5.744759>
19. Tu J., Zhao D., Zhao J., Zhao Q. Experimental study on crack initiation and propagation of wood with LT-type crack using digital image correlation (DIC) technique and acoustic emission (AE). *Wood Science and Technology*. 2021; 55(6): 1577-1591. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01252-8>
20. Guo Y., Zhu S., Chen Y., Liu D., Li D. Acoustic Emission-Based Study to Characterize the Crack Initiation Point of Wood Fiber/HDPE Composites. *Polymers*. 2019; 11(4): 701. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11040701>
21. Reinprecht L., Šupina P. Comparative evaluation of inspection techniques for impregnated wood utility poles: ultrasonic, drill-resistive, and CT-scanning assessments. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2015; 73(6): 741-751. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0943-8>
22. Peng L., Wang H., Zhang H., Xin Z., Ke D., Lei Z., Ye Q. Study of the effect of hole defects on wood heat transfer based on infrared thermography. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023; 191: 108295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108295>

23. Руссу А.В., Шамаев В.А., Разиньков Е.М., Зимелис А. Исследование внутреннего трения натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth). Лесотехнический Журнал. 2023; 13(1): 236-256. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/16>. Режим доступа <https://elibrary.ru/item.asp?id=53814701>

24. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины: монография. 2-е издание, перераб. и доп. Воронеж: ВГЛТУ. 2022. 571 с. Режим доступа <https://elibrary.ru/item.asp?id=50026105>

25. Зарипов, Ш. Г. Систематизация факторов, влияющих на образование трещин в листовенных пиломатериалах при сушке // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018; 3(363): 127-136. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127. Режим доступа <https://elibrary.ru/item.asp?id=35018828>

### References

1. Dahle S., Pilko M., Žigon J., Zaplotnik R., Petrič M., Pavlič M. An open-source surface barrier discharge plasma pretreatment for reduced cracking of outdoor wood coatings. *Cellulose*. 2021; 28(12): 8055-8076. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04014-2>

2. Abdollahzadeh Jamalabadi M.Y. Optimal rectangular crack pattern based on constructal, fracture saturation, and energy minimization theories for painting on wood. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022; 160: 112242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112242>

3. Chai Yuan, Tao Xin, Liang Shanqing, Fu Feng Preparation and property characterization of crack-filled type microwave puffed wood based metal composites. 2021; 43: 118-125. DOI: <http://j.bjfu.edu.cn/cn/article/doi/10.12171/j.1000-1522.20210209>

4. Zeltiņš P., Katrevičs J., Gailis A., Maaten T., Bāders E., Jansons Ā. Effect of Stem Diameter, Genetics, and Wood Properties on Stem Cracking in Norway Spruce. *Forests*. 2018; 9(9): 546. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9090546>

5. Mezui E.N., Nziengui C.F.P., Pitti R.M., Ikogou S., Ango S.E., Talla P.K. Strain and cracks investigations on tropical green wood slices under natural drying: experimental and numerical approaches. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2022; 81(1): 187-207. DOI: 10.1007/s00107-022-01881-9

6. Fu Z., Chen J., Zhang Y., Xie F., Lu Y. Review on Wood Deformation and Cracking during Moisture Loss. *Polymers*. 2023; 15(15): 3295. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15153295>

7. Botter-Kuisch H.P., Van den Bulcke J., Baetens J.M., Van Acker J. Cracking the code: real-time monitoring of wood drying and the occurrence of cracks. *Wood Science and Technology*. 2020; 54(4): 1029-1049. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01200-6>

8. He J., She Y., Li M., Cai G., Hu B. Experimental Study on the Crack Evolution Pattern of Pine Wood with Different Moisture Content. *Scholars Journal of Engineering and Technology*. 2022; 10(6): 102-110. DOI: <https://doi.org/10.36347/sjet.2022.v10i06.002>

9. Christoforo A.L., Penteado L.D., Camargo M.V. de, Arroyo F.N., Santos H.F. dos, Dias A.M.P.G., Lahr F.A.R. Estimative of Wood Strength in the Tensile Perpendicular to the Grain by the Cracking Strength. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4201159>

10. Zhang R., Taylor A., Charalambides M., Balint D., Young C., Barbera D., Blades N. A Numerical Model for Predicting the Time for Crack Initiation in Wood Panel Paintings Under Low-Cycle Environmentally Induced Fatigue. *SSRN Electronic Journal*. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4295737>

11. Autengruber M., Lukacevic M., Gröstlinger C., Füssl J. Finite-element-based prediction of moisture-induced crack patterns for cross sections of solid wood and glued laminated timber exposed to a realistic climate condition. *Construction and Building Materials*. 2021; 271: 121775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121775>

12. Ostapska K., Malo K.A. Crack path tracking using DIC and XFEM modelling of mixed-mode fracture in wood. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2021; 112: 102896. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102896>



13. Supriatna D., Yin B., Konopka D., Kaliske M. An anisotropic phase-field approach accounting for mixed fracture modes in wood structures within the Representative Crack Element framework. *Engineering Fracture Mechanics*. 2022; 269: 108514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108514>
14. Zizhen G., Gong M., Li L., Mohammadi M. An exploratory study on mixed-mode fracture and strain distribution near a crack tip of adhesively-laminated wood specimens using the modified arcon fixture and digital image correlation. *World Conference on Timber Engineering (WCTE 2023)*. 2023: 111-118. DOI: <https://doi.org/10.52202/069179-0015>
15. Carlsson J., Isaksson P. Dynamic crack propagation in wood fibre composites analysed by high speed photography and a dynamic phase field model. *International Journal of Solids and Structures*. 2018; 144-145: 78-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.04.015>
16. Lin Y., Xu Z., Chen D., Ai Z., Qiu Y., Yuan Y. Wood Crack Detection Based on Data-Driven Semantic Segmentation Network. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. 2023; 10(6): 1510-1512. DOI: <https://doi.org/10.1109/JAS.2023.123357>
17. Cao X., Li G. An Effective Method of Wood Crack Trace and Quantity Detection Based on Digital Image Processing Technology. *2021 13th International Conference on Machine Learning and Computing: ICMLC 2021*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. 2021; 304-309. DOI: <https://doi.org/10.1145/3457682.3457728>
18. Huang C., Li M., Fang S., Zhao Y., Mao F. Research on the effect of wood surface cracks on propagation characteristics and energy attenuation of longitudinal acoustic emission. *Wood Research*. 2022; 67(5): 744-759. DOI: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.5.744759>
19. Tu J., Zhao D., Zhao J., Zhao Q. Experimental study on crack initiation and propagation of wood with LT-type crack using digital image correlation (DIC) technique and acoustic emission (AE). *Wood Science and Technology*. 2021; 55(6): 1577-1591. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01252-8>
20. Guo Y., Zhu S., Chen Y., Liu D., Li D. Acoustic Emission-Based Study to Characterize the Crack Initiation Point of Wood Fiber/HDPE Composites. *Polymers*. 2019; 11(4): 701. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11040701>
21. Reinprecht L., Šupina P. Comparative evaluation of inspection techniques for impregnated wood utility poles: ultrasonic, drill-resistive, and CT-scanning assessments. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2015; 73(6): 741-751. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0943-8>
22. Peng L., Wang H., Zhang H., Xin Z., Ke D., Lei Z., Ye Q. Study of the effect of hole defects on wood heat transfer based on infrared thermography. *International Journal of Thermal Sciences*. 2023; 191: 108295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108295>
23. Russu A.V., Shamaev V.A., Razinkov E.M., Ziemelis A. Internal friction investigation of the natural and compressed birch (*Betula pendula* Roth) wood. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*. 2023; 13, 1 (49), 236-256 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/16>. Access mode <https://elibrary.ru/item.asp?id=53814701>
24. Shamaev V.A., Nickulina N.S., Medvedev I.N. *Wood modification: monograph*. 2nd edition, revised. and additional Voronezh: VGLTU. 2022. 571 p. (in Russian). Access mode <https://elibrary.ru/item.asp?id=50026105>
25. Zaripov Sh.G. Systematization of Factors Affecting the Cracking of Larch Lumber during Wood Drying. *Lesnoy zhurnal [Forestry journal]*, 2018; 3: 127–136 (in Russian). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.127. Access mode <https://elibrary.ru/item.asp?id=35018828>

### Сведения об авторах

*Руссу Александр Викторович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8525-0348>, e-mail: [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru).

✉ *Шамаев Владимир Александрович* – доктор технических наук, профессор., ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1762-7956>, e-mail: [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru)

*Зимелис Андрис* – доктор технических наук, Технический университет г.Рига, ул. Кипсала, 6а, Рига, Латвия, LV-1048, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6919-9263>, e-mail: [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv).

### Information about the authors

*Alexander V. Russu* – postgraduate, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F.Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8525-0348>, e-mail: [arussu@mail.ru](mailto:arussu@mail.ru).

✉ *Vladimir A. Shamaev* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1762-7956>, e-mail: [drevstal@mail.ru](mailto:drevstal@mail.ru).

*Andris Ziemelis* – Doctor of Technical Sciences, Technische Universitat Riga, Kipsalasiela 6a, Centrarajons, Riga, Latvia, LV-1048, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6919-9263>, e-mail: [andrisin@inbox.lv](mailto:andrisin@inbox.lv).

✉ Для контактов / Corresponding author



Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/16>

УДК 631.445.4:631.42



## Агроэкологическая характеристика черноземов Каменной степи: влияние растительных сообществ и распашки

Елена Н. Тихонова<sup>1</sup>✉, [tichonova-9@mail.ru](mailto:tichonova-9@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>

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

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

Геннадий А. Одноралов<sup>1</sup>, [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7154-6807>

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

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394018, Россия

Изменения в запасах углерода в почвенном покрове влияют на концентрацию CO<sub>2</sub> в атмосфере и глобальный углеродный баланс. Несмотря на доказанную эффективность агролесомелиорации в борьбе с эрозией, потерей плодородия почв, имеется много неоднозначных данных, свидетельствующих о необходимости дальнейшего изучения влияния облесения на чернозёмные почвы. Каменная степь представляет особый интерес для мониторинговых исследований в рамках проекта по определению углеродного баланса агроэкосистем (карбоновые полигоны). Расположенные в непосредственной близости лесные полосы принимают активное участие не только в улавливании углекислого газа, но и в эволюции почвенного покрова. Настоящее исследование предполагает анализ основных агроэкологических показателей черноземов Каменной степи и оценку влияния распашки на их трансформацию. Важность исследований заключается и в том, что изучалось влияние различных типов растительных сообществ на почвенный покров. Изучение основных химических показателей черноземов осуществлялось классическими химическими методами, анализ тяжелых металлов проводился вольтамперометрическим методом. Изученные черноземы обыкновенные имеют высокое содержание органического вещества, достигающее в верхних горизонтах 7-8%, обогащены элементами минерального питания и имеют благоприятные физико-химические показатели. Лесная и лугово-степная растительность способствует обогащению почвы органическими остатками, в то время как вспашка и минерализация органических веществ на пахотных землях приводят к снижению процентного содержания гумуса. Для наиболее полной агроэкологической характеристики исследуемых черноземов изучалось валовое содержание и подвижные соединения тяжелых металлов – свинца и кадмия. Анализ полученных данных позволяет говорить об отсутствии загрязнения исследуемой территории. При этом органическое вещество исследуемых черноземов способно сорбировать изучаемые металлы и удерживать их в недоступном состоянии. Данное явление доказывается довольно высокими коэффициентами корреляции между гумусом и валовым содержанием тяжелых металлов ( $r = 0,946$  для Pb и  $r = 0,975$  для Cd при  $p < 0,00001$ ). Следует подчеркнуть то, что лесополосы способны выступать своеобразным биогеохимическим барьером на пути латеральной миграции исследуемых тяжелых металлов. Кадмий является довольно мобильным элементом, способным мигрировать в сопредельные среды. Поэтому необходим регулярный контроль за агроэкологическим состоянием черноземов Каменной степи.

**Ключевые слова:** Каменная степь, черноземы, растительные сообщества, гумус, тяжелые металлы, свинец, кадмий, агроэкологическая оценка, карбоновый полигон.

**Финансирование:** работа выполнена 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:** Агроэкологическая характеристика черноземов Каменной степи: влияние растительных сообществ и распашки / Е. Н. Тихонова, Н. С. Горбунова, С. С. Шешницан, Г. А. Оdnоралов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 236–248. – Библиогр.: с. 244–248 (26 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/16>.


*Поступила* 02.10.2023. *Пересмотрена* 17.11.2023. *Принята* 17.11.2023. *Опубликована онлайн* 30.11.2023.

## Article

### Agro-ecological characterization of chernozems of the Kamennaya steppe: the impact of vegetation and tillage

Elena N. Tikhonova<sup>1</sup>✉, [tichonova-9@mail.ru](mailto:tichonova-9@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>

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>

Gennadiy A. Odnorolov<sup>1</sup>, [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-7154-6807>

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

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

#### Abstract

Changes in soil carbon stocks have a significant impact on atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations and the global carbon balance. Despite the proven effectiveness of agroforestry in erosion control and prevention of soil fertility loss, there are many controversial data suggesting that the impact of afforestation on Chernozem soils should be further investigated. The Kamennaya Steppe site (arable land surrounded by shelterbelt forests) is a reference site for monitoring studies at the Voronezh Carbon Test Site, where the carbon balance of agro-ecosystems is being studied and the ecological role of shelterbelt forests in changing soil properties and carbon sequestration is being evaluated. The study was focused on the evaluation of agro-ecological characteristics and the impact of tillage on Chernozems of Kamennaya Steppe under different vegetation types. The study of the chemical properties of chernozems was carried out using classical chemical methods; the analysis of heavy metals was carried out using the voltampermetric method. Comprehensive agro-ecological evaluation showed that the studied Vorony-Calci Chernozems had a high content of humus, which reached 7-8% in the upper horizons, enriched with mineral nutrition elements, and had favorable physical and chemical properties. Forest and grassland vegetation contribute to enrichment of the soil with organic residues, while tillage and mineralization of organic matter on arable land led to a decrease in humus content. Data analysis suggested that the study area did not suffer from contamination. Furthermore, it was found that the organic matter of the studied chernozems was able to bind the studied metals and retain them in an unavailable state. This phenomenon was supported by rather high correlations between humus and total heavy metal content ( $r = 0.946$  for Pb and  $r = 0.975$  for Cd at  $p < 0.00001$ ). It should be emphasized that shelterbelt forests could act as a biogeochemical barrier to the lateral migration

of heavy metals. Cadmium is a rather mobile element potentially capable to migrate to adjacent environments. Therefore, regular monitoring of the agro-ecological condition of the Chernozems of the Kamennaya Steppe is required.

**Keywords:** *Kamennaya steppe, Chernozems, vegetation, humus, heavy metals, lead, cadmium, agro-ecological assessment, carbon test site.*

**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 conflicts of interest.

**For citation:** Tikhonova E. N., Gorbunova N. S., Sheshnitsan S. S., Odnoralov G. A. (2023). Agroecological characterization of Chernozems of the Kamennaya Steppe: the impact of vegetation and tillage. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 236-248 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/16>.

**Received** 02.10.2023. **Revised** 17.11.2023. **Accepted** 17.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

### Введение

По оценкам исследователей, глобальный почвенный пул углерода более чем в три раза превышает атмосферный и примерно в четыре раза – биомассы. Почвенные пулы углерода считаются как важными источниками, так и поглотителями CO<sub>2</sub> из атмосферы, поэтому любое изменение их запасов оказывает существенное воздействие на концентрацию CO<sub>2</sub> и глобальный баланс углерода в целом [1]. Создание защитных лесных насаждений на землях сельскохозяйственного назначения широко признано как высокоэффективная стратегия борьбы с ветровой и водной эрозией пахотных почв [2], которая благоприятствует сохранению почвенного плодородия и запасов углерода в почвенном резервуаре [3, 4]. Однако неоднозначные результаты исследований реакции почв на агролесомелиорацию [5-7] свидетельствуют о необходимости проведения дополнительного изучения, что позволит лучше понять потенциал лесоразведения для увеличения секвестрации углерода на сельскохозяйственных землях.

Выбор территории Каменной степи для включения в состав исследовательского стационара карбонового полигона в Воронежской области был не случаен. С одной стороны, эта территория представляет собой классический вариант адаптивно-ландшафтной системы земледелия и является ре-

презентативным типом агроэкосистем Центрального Черноземья [8]. С другой стороны, территория находится вдали от большинства источников антропогенного загрязнения, которыми являются любые добывающие и перерабатывающие предприятия, а также крупные автомагистрали с высокой нагрузкой.

Территория Каменной степи фигурировала в качестве одного из ведущих участков исследования в экспедиции, организованной В.В. Докучаевым, с целью создания мероприятий по борьбе с засухой в степных районах. В настоящий момент территория сохранила свою уникальность и переведена в статус заказника федерального подчинения. Участок позволяет получить уникальные данные, которые в дальнейшем можно использовать для ведения мониторинговых исследований [9, 10], в том числе наблюдения за поведением естественной радиоактивности почв [11].

Особо следует подчеркнуть длительность функционирования лесных полос, которые оказывают, несомненно, важную экологическую роль [12]. Под пологом лесной растительности формируются интразональные биоклиматические условия. Они определяются, прежде всего, повышением влажности, как наземной части, так и почвенного покрова относительно незатененных пахотных участков. Оптимальная влажность, отсутствие рез-

ких перепадов температур создают более комфортные условия для усиления роста растительных организмов. Ежегодное поступление растительного опада и отмерших корней благоприятно сказывается на положительном балансе гумуса [13]. Кроме того, отмечается оптимизация физических (плотность сложения, содержание физической глины и ила), водно-физических (водо- и воздухопроницаемость), физико-химических показателей почв под лесными насаждениями. Улучшение описанных свойств приводит к накоплению микробной биомассы, усилению дыхательной и микробиологической активности, дополнительной фиксации азота [14]. В современных экологических условиях крайне важным является возможность потребления углекислого газа лесными насаждениями [15-17].

В цели данной работы входила агроэкологическая характеристика черноземов Каменной степи, расположенных под различными растительными сообществами (лугово-степная и древесная растительность), а также оценка влияние распашки на химические и физико-химические свойства черноземов.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследований*

Исследования проводились в течение полевых сезонов 2022-2023 гг. Объектом исследования являлась Каменная степь, расположенная в Таловском районе Воронежской области и имеет официальный статус государственного природного заказника федерального значения. Территория расположена на стыке Окско-Донской низменности и Среднерусской возвышенности. Для Каменной степи характерен довольно пестрый и разнообразный почвенный покров. Важной её особенностью является часто встречающиеся пятна и ареалы солонцов (Vertic Solonetz) [18, 19]. На рисунке 1 представлена исследуемая лесополоса №211, под которой залегают черноземы обыкновенные среднесиловые среднегумусные тяжелосуглинистые на покровных карбонатных глинах (Vorony-Calci Chernozems).



Рисунок 1. Лесополоса и прилегающая к ней пашня  
 1 – (N 51.051847°, E 40.739985°); 2 – (N 51.051302°, E 40.743098°); 3 – (N 51.050917°, E 40.746058°); 4 – (N 51.050580°, E 40.748916°); 5 – (N 51.052328°, E 40.747665°)

Источник: собственные данные авторов

Figure 1. Shelterbelt forest and adjacent arable land

Source: authors' own data

Возраст лесополосы насчитывает более 60 лет, поскольку начало ее закладки было проведено в 1959 году. На небольшом участке (850×22 м), который занимает лесная полоса, диагонально-групповым способом, заложили четыре секции следующих древесных пород: лиственница сибирская (*Larix siberica* Ldb.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) и береза бородавчатая (*Betula verrucosa* Ehrh).

Указанные на схеме точки копания (рис. 1) отражают схему заложения почвенных разрезов в исследуемой лесополосе и на расположенной в непосредственной близости пашне.

Объектами исследования являлись и оба варианта залежных участка – косимый и некосимый (рис. 2). Растительность этих участков представлена разнотравно-злаковыми сообществами, причем для некосимой залежи характерно присутствие древесных пород.



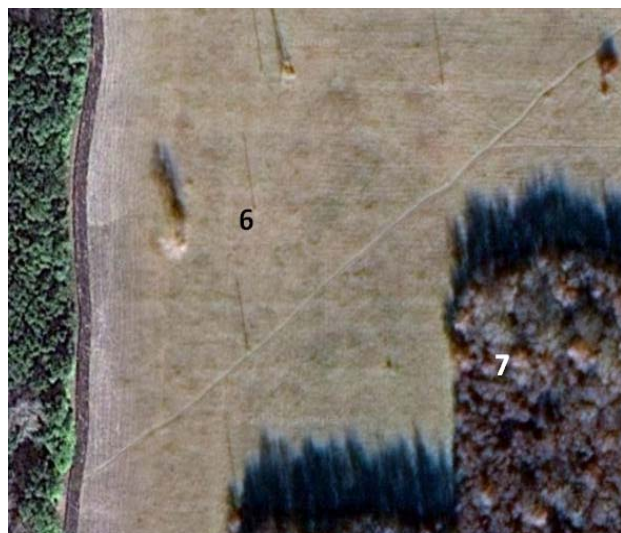


Рисунок 2. Залежные участки

- 6 – залежь косимая (N 51.032165°, E 40.728346°)  
7 – залежь некосимая (N 51.031757°, E 40.729580°)

Источник: собственные данные авторов

Figure 2. Fallow plots

- 6 – mowing fallow (N 51.032165°, E 40.728346°)  
7 – non-mowing fallow (N 51.031757°, E 40.729580°)

Source: authors' own data

#### – Дизайн эксперимента

Полнопрофильные разрезы закладывались до глубины залегания почвообразующих пород, которыми в данном регионе являются покровные карбонатные глины, а также лессовидные глины, подстилаемые коричнево-бурыми глинами [20].

Отбор образцов для проведения общих химических и физико-химических анализов осуществлялся каждые 20 см. В почвенных образцах определяли pH водной суспензии потенциометрическим методом, с помощью микропроцессорного иономера И-160МИ (Aquila, Moscow, Russia). В некарбонатных почвенных образцах pH < 7,5 проводили определение гидролитической кислотности по Каппену, обменные катионы Ca<sup>2+</sup> Mg<sup>2+</sup> в карбонатных и некарбонатных почвах. Определение щелочногидролизующего азота методом Корнфилда. Определение подвижного фосфора проводили по методу Ф.В. Чирикова. Определение подвижного фосфора в карбонатных почвах осуществляли в вытяжке Б.П. Мачигина, калия некарбонатных почв – в вытяжке А.Л. Масловой, калия карбонатных почв – в вытяжке Протасова. Валовое содержание

гумуса определяли по И.В. Тюрину [21]. Навески почв для анализов взвешивали на весах HR-100ARG. Для получения аналитического материала применялись химические реактивы и лабораторная посуда фирмы Vekton Российского производства (Санкт-Петербург).

Для характеристики экологического состояния черноземов Каменной степи исследовалось валовое содержание и обменные соединения наиболее опасных загрязнителей окружающей среды – свинца и кадмия. Данные формы соединений позволяют не только охарактеризовать общую ландшафтно-геохимическую обстановку, но и показать степень подвижности тяжелых металлов, их доступность для растительных организмов, а также показать возможные пути миграции этих элементов в ландшафте [22-25]. Для наиболее полного извлечения валового содержания свинца и кадмия из отобранных образцов, почву прокаливали при температуре 505°C в течение 3 часов, в муфельной печи SNOL (Umega, Lithuania). Далее из прокаленной почвы отбирались аналитические пробы (навески) массой 5,0±0,1 г, которые помещались в термостойкие химические колбы вместимостью 100 мл. К навескам приливали концентрированную азотную кислоту (HNO<sub>3</sub>) (Vekton, St. Petersburg, Russia) в соотношении 1:1, и содержимое колб кипятили на лабораторных электроплитках в течение 10 минут. После охлаждения к содержимому колб приливали концентрированную (30%) перекись водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (Vekton, St. Petersburg, Russia) и вновь кипятили в течение 10 минут. После второго кипячения и охлаждения, содержимое колб фильтровали через плотный фильтр (синяя лента) (Vekton, St. Petersburg, Russia). Объем полученного фильтрата помещали в мерную колбу вместимостью 50 мл и доводили дистиллированной водой до метки. Для извлечения подвижных соединений свинца и кадмия из почвенных образцов использовался кислый раствор (pH = 4.8) ацетатно-аммонийной буферной смеси (ААБ). Количественное отношение почва : раствор составляет 1:10 [24]. В полученных вытяжках определяли количество Pb и Cd методом инверсионной вольтамперометрии на вольтамперометрическом анализаторе ТА-4 (ТА-Lab, Tomsk, Russia). Географические координаты мест закладки

почвенных разрезов определяли с помощью GPS-навигаторов фирмы Garmin.

*Анализ данных*

Статистическая обработка полученных данных и графическое их отображение осуществлялось путем применения программного пакета STATISTICA 12. Для определения статистической значимости различий использовался непараметрический *U*-критерий Манна-Уитни. Взаимосвязь двух переменных доказывали с помощью коэффициента корреляции (*r*) Пирсона.

**Результаты и обсуждение**

Исследуемые черноземы обыкновенные имеют достаточно высокое содержание органического вещества. Так, количество гумуса достигает  $8,1 \pm 0,51\%$  в слое 0-20 см залежных участков, почвы диагностируются как среднегумусные. В почвах под лесополосами также отмечается довольно высокое содержание гумуса, которое в среднем составляет  $7,7 \pm 0,47\%$  (табл. 1). Лесная и лугово-степная растительность остается как на поверхности, так и в профиле исследуемых почв, интенсивно вовлекается в биологический круговорот, обогащая профиль органическими остатками. На территории

пашни описанного явления не наблюдается. Растения ежегодно выносят с урожаем довольно большие запасы веществ как органического, так и минерального происхождения. Кроме того, в результате распашки отмечается увеличение минерализации гумусовых веществ и их интенсивный распад. Все это приводит к сокращению содержания гумуса в верхних горизонтах почв до  $6,2 \pm 0,38\%$ , достоверно отличающемуся ( $p < 0,05$ ) от необрабатываемых участков (табл. 1).

Реакция среды в верхних горизонтах исследуемых черноземов нейтральная и составляет на залежи  $7,1 \pm 0,72$ , на пашне  $7,3 \pm 0,41$  единицы. Под лесополосами наблюдается незначительное подкисление среды за счет корневых выделений древесных растений, имеющих кислую природу (табл. 1). Следует отметить, что древесная растительность была высажена на территории Каменной степи с целью накопления и удержания влаги. С данной функцией лесополосы успешно справляются, что подтверждается более глубоким промачиванием почвенного профиля, следствием чего является и гидролитическая кислотность, которая была зафиксирована вплоть до глубины 60 см (табл. 1).

Таблица 2

Химические и физико-химические показатели черноземов обыкновенных Каменной степи под различными угодьями (среднее значение  $\pm$  ошибка среднего арифметического)

Table 2

Chemical and physico-chemical parameters of Vorony-Calcic Chernozems under various land use in Kamennaya Steppe (mean  $\pm$  SE)

Глубина, см   Depth, cm	Гумус, %   humus	pH <sub>водный</sub>   pH <sub>water</sub>	Обменные катионы H <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , смоль(экв)/кг   Exchangeable cations H <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , cmol(eq)/kg			Подвижные соединения, мг/100 г   Mobile forms, mg/100 g		
			H <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> +	Mg <sup>2+</sup> 2+	N	P	K
Черноземы под залежью, n = 10   Chernozems under fallow, n = 10								
0-20	8,1 $\pm$ 0,51a	7,1 $\pm$ 0,72a	0,7 $\pm$ 0,09a	46,5 $\pm$ 1,21a	7,7 $\pm$ 0,71a	28,7 $\pm$ 1,04a	9,8 $\pm$ 0,98a	8,4 $\pm$ 0,47a
20-40	6,4 $\pm$ 0,27a	7,4 $\pm$ 0,64a	0,1 $\pm$ 0,08a	45,4 $\pm$ 1,14a	7,1 $\pm$ 0,62a	26,0 $\pm$ 0,98a	8,6 $\pm$ 0,74a	8,2 $\pm$ 0,40a
40-60	4,1 $\pm$ 0,34a	7,6 $\pm$ 0,51a	-	41,2 $\pm$ 1,07a	6,9 $\pm$ 0,59a	20,1 $\pm$ 0,97a	7,7 $\pm$ 0,61a	7,8 $\pm$ 0,31a
60-80	2,1 $\pm$ 0,24a	7,9 $\pm$ 0,43a	-	40,0 $\pm$ 1,05a	6,9 $\pm$ 0,52a	15,2 $\pm$ 1,00a	6,9 $\pm$ 0,48a	6,7 $\pm$ 0,19a
80-100	1,5 $\pm$ 0,21a	8,2 $\pm$ 0,41a	-	38,7 $\pm$ 1,11a	6,6 $\pm$ 0,51a	11,3 $\pm$ 0,95a	5,1 $\pm$ 0,35ab	6,5 $\pm$ 0,22a
100-120	0,8 $\pm$ 0,17a	8,5 $\pm$ 0,31a	-	35,4 $\pm$ 1,01a	6,5 $\pm$ 0,38a	9,2 $\pm$ 0,51a	5,1 $\pm$ 0,32a	5,1 $\pm$ 0,12ab
Черноземы под лесополосой, n = 20   Chernozems under shelterbelt, n = 20								
0-20	7,7 $\pm$ 0,47a	6,9 $\pm$ 0,61b	1,0 $\pm$ 0,09b	45,9 $\pm$ 1,18a	7,5 $\pm$ 0,69a	25,7 $\pm$ 1,02b	8,8 $\pm$ 0,71ab	8,1 $\pm$ 0,34a

20-40	6,2±0,39a	7,2±0,57b	0,8±0,07b	43,4±1,05b	7,0±0,63a	21,4±0,94a	8,1±0,62a	8,1±0,29a
40-60	4,2±0,33a	7,4±0,43b	0,1±0,03	40,6±0,98a	6,8±0,57a	20,3±0,93a	7,9±0,59a	7,6±0,25a
60-80	2,3±0,28a	7,7±0,41b	-	39,9±0,99a	6,7±0,55a	18,7±1,01b	7,4±0,55a	7,5±0,19a
80-100	1,6±0,25a	8,0±0,32b	-	38,6±1,06a	6,5±0,41a	13,1±1,00a	6,8±0,43b	7,0±0,14a
100-120	0,7±0,12ab	8,3±0,17b	-	35,7±1,10a	6,4±0,37a	7,6±0,44b	6,1±0,38a	7,0±0,11a
Черноземы под пашней, $n = 5$   Chernozems under arable land, $n = 5$								
0-20	6,2±0,38b	7,3±0,41c	0,4±0,05c	42,0±1,21b	7,6±0,62a	18,2±1,00c	7,0±0,69b	5,7±0,37b
20-40	4,5±0,33b	7,4±0,36a	0,1±0,03a	40,9±1,17c	7,2±0,54a	14,3±0,97a	6,1±0,54b	5,4±0,33b
40-60	2,4±0,46b	7,7±0,32a	-	39,5±1,06a	6,9±0,51a	11,0±0,95b	5,8±0,37b	5,2±0,26b
60-80	1,8±0,18b	7,9±0,17a	-	38,8±1,09a	6,8±0,46a	10,6±0,93c	4,2±0,25b	4,7±0,23b
80-100	1,1±0,11b	8,2±0,21a	-	37,6±1,01a	6,5±0,38a	9,3±0,41b	4,1±0,15a	4,4±0,17b
100-120	0,6±0,10b	8,5±0,14a	-	35,5±0,97a	6,4±0,31a	5,1±0,34c	3,9±0,09b	4,1±0,11b

Примечание: a, b, c – статистически значимые различия ( $p < 0,05$ ) между средними значениями по глубине в чернозёмах под разными угодьями согласно  $U$ -тесту Манна-Уитни (одинаковые буквы означают отсутствие достоверных различий, разные – различия достоверны на заданном уровне значимости).

Note: a, b, c – statistically significant differences ( $p < 0.05$ ) between the mean values for each depth of chernozems under the different land use by Mann-Whitney  $U$ -test (the same letters indicate the absence of significant differences, the different letters – the differences are statistically significant).

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

В нижней части профиля гидролитическая кислотность исчезает полностью, поскольку данная величина является рН-зависимой, а почвы образованы на карбонатных почвообразующих породах, имеющих щелочную реакцию среды. Обменный катион кальция накапливается в почвенно-поглощающем комплексе верхних горизонтов. Данный катион имеет большое сродство к коллоидным фракциям, имеющим органоминеральную природу. Вследствие чего отмечается довольно высокая корреляционная зависимость ( $r = 0,98$ ) между профильным распределением органического вещества и обменного катиона  $\text{Ca}^{2+}$ . Обменный  $\text{Mg}^{2+}$  более равномерно распределен по почвенному профилю, в основном на его содержание и распределение большей мере оказывают влияние почвообразующие породы.

Согласно общепринятой градации почв [21], исследуемые чернозёмы хорошо обеспечены основными элементами минерального питания – N, P, K (табл. 1). Наибольшее их количество отмечается в верхних горизонтах, поскольку запас данных элементов сильно зависит от процентного содержания гумуса. В черноземах пашни определено статисти-

чески значимое снижение ( $p < 0,05$ ) содержания подвижных форм азота, фосфора и калия, за счет их интенсивного потребления сельскохозяйственными культурами. Что касается профильного распределения данных элементов, то все исследуемые чернозёмы характеризуются постепенным снижением их валовых количеств аналогично содержанию гумуса.

С точки зрения экологического состояния почвенного покрова, важно иметь представление о валовом содержании и подвижных соединениях тяжелых металлов, среди большого перечня которых свинец и кадмий являются приоритетными загрязнителями. Несомненно, что вдали от основных источников загрязнения их содержание не будет превышать предельно-допустимые концентрации. Кроме того, чернозёмы обладают высокой буферной способностью и переводят большинство загрязнителей в недоступное для растений состояние. В наших исследованиях важным является определение степени их подвижности, а соответственно доступности растительным организмам. Поскольку при увеличении антропогенной нагрузки

ки будет происходить и усиление поступления элементов в круговорот.

Согласно полученным данным, а также исследованиям, проводимым ранее [26], повышенной способностью сорбировать тяжелые металлы обладает органическое вещество черноземов, при этом прослеживается статистически значимая тесная

корреляционная зависимость ( $r > 0,9$ ). Данное явление подтверждается модельным экспериментом, результаты которого представлены на рисунке 3.

Так, несмотря на довольно высокую степень подвижности кадмия, которая достигает 21%, отмечается высокая сорбционная способность органического вещества к металлу (рис. 3, Б).

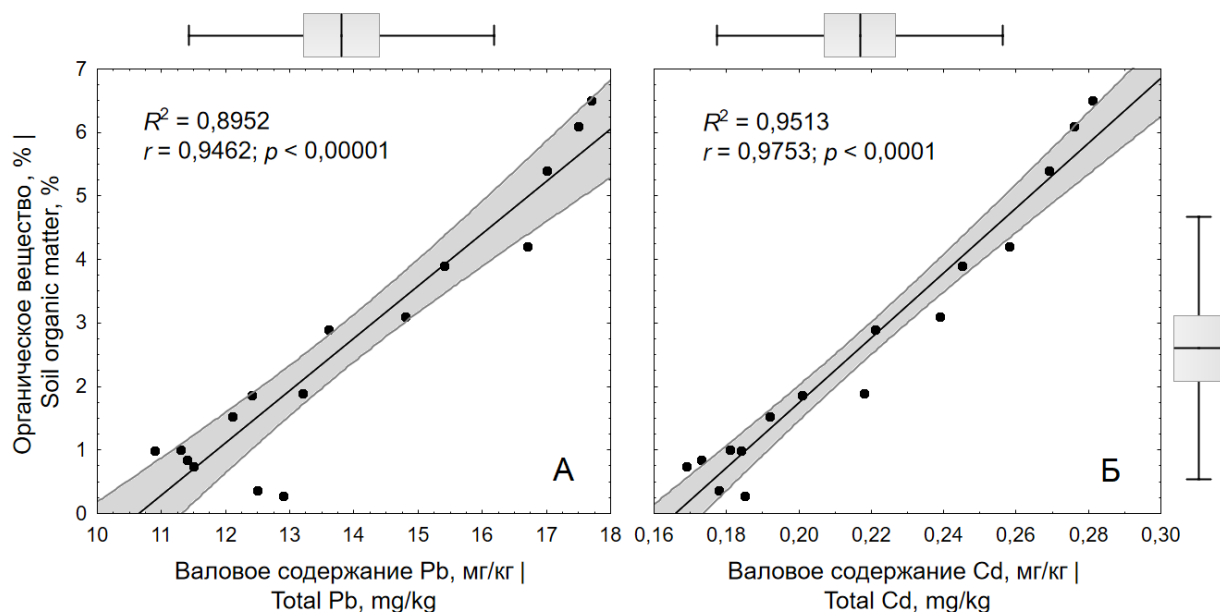


Рисунок 3. Зависимость валового содержания свинца (А) и кадмия (Б) от содержания органического вещества в черноземах обыкновенных ( $n = 16$ ). Серым цветом на графиках обозначен 95 %-й доверительный интервал.

Боксплот: средняя линия – среднее значение, ящик – стандартная ошибка, усы – стандартное отклонение.

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 3. Dependence of total lead (A) and cadmium (B) content from organic matter content in Vorony-Calcic Chernozems ( $n = 16$ ). Grey colour on the graphs indicates 95%-confidence interval. Boxplot: midline – mean value, box – standard error, whiskers – standard deviation.

Source: authors' own calculations

Коэффициент подвижности свинца не превышает 10%, но, согласно модельному эксперименту, сорбционная способность гумуса к элементу несколько ниже, чем у кадмия (рис. 3, А). На иммобилизацию свинца большее влияние оказывает реакция среды, что подтверждается экспериментальными данными.

Очевидно, что валовое содержание и обменные формы соединений исследуемых тяжелых металлов не превышают предельно допустимые концентрации (ПДК), несмотря на это важным является довольно высокая степень подвижности кадмия. Даже несмотря на сорбцию элемента органическим веществом и карбонатами почвенного раствора,

довольно высокий процент металла содержится в легкодоступной форме.

### Заключение

Исследуемые черноземы обыкновенные в верхних горизонтах имеют довольно высокое процентное содержание гумуса, которое постепенно снижается с глубиной почвенного профиля. Реакция среды в верхних горизонтах – нейтральная, вниз по профилю она постепенно возрастает, и становится щелочной, за счет влияния карбонатов почвообразующих пород. Почвенно-поглощающий комплекс насыщен катионами кальция и магния, обменный водород зафиксирован преимущественно



в верхних горизонтах черноземов под лесополосой. Данное явление связано с тем, что лесополосы выполняют влагоудерживающую функцию. Повышенное содержание влаги совместно с корневыми выделениями древесных пород приводит к усилению гидролиза, что в свою очередь ускоряет вытеснение катионов кальция из почвенно-поглощающего комплекса. Вытесненный кальций активно поглощается древесной растительностью в качестве элемента минерального питания, а его место занимает обменный водород.

Агрохимические показатели (азот, фосфор и калий) исследуемых черноземов имеют также высокие показатели, особенно в черноземах под зале-

жью и лесополосой. Эти показатели имеют достаточно высокую вариабельность (от 5,1 до 28,7 мг на 100 г почвы), поскольку легко доступны для поглощения растительным организмам.

Валовое содержание и обменные формы соединений свинца и кадмия не превышают ПДК, принятых для почв черноземного ряда. Полученные данные можно использовать в качестве фоновых показателей при разнообразных мониторинговых исследованиях, в том числе для организации стационарных наблюдений за динамикой пулов углерода и потоков парниковых газов в репрезентативных для лесостепной зоны агроландшафтах Каменной степи.

### Список литературы

1. Абакумов Е.В., Поляков В.И., Чуков С.Н. Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов России (обзор). *Почвоведение*. 2022;7:773–786. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48621435>.
2. Zhidkin A., Fomicheva D., Yurova A., Ivanova N., Dostál T., Krása J., Komissarov M. A detailed reconstruction of changes in the factors and parameters of soil erosion over the past 250 years in the forest zone of European Russia (Moscow region). *International Soil and Water Conservation Research*. 2022;1(10):149-160. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.003>.
3. Frolov P., Shanin V., Zubkova E., Bykhovets S., Grabarnik P. CAMPUS-S – The model of ground layer vegetation populations in forest ecosystems and their contribution to the dynamics of carbon and nitrogen. I. Problem formulation and description of the model. *Ecological Modelling*. 2020;431: 109184. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109184>.
4. Kramareva T.N., Tikhonova E.N., Gromovik A.I., Gorbunova N.S., Korolev V.A. Influence of various tree species on the properties of soils in the "Kamennaya steppe": IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Forestry Forum "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions"". 2021:12020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012020>.
5. 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;8:934–947. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42994976>.
6. Wu Y., Wang Q., Wang H., Wang W., Han S. Shelterbelt Poplar Forests Induced Soil Changes in Deep Soil Profiles and Climates Contributed Their Inter-site Variations in Dryland Regions, Northeastern China. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2019.00220>.
7. Wu Y., Wang W., Wang Q., Zhong Z., Wang H., Yang Y. Farmland Shelterbelt Changes in Soil Properties: Soil Depth-Location Dependency and General Pattern in Songnen Plain, Northeastern China. *Forests*. 2023;14(3):584 <http://dx.doi.org/10.3390/f14030584>.
8. Чухлебова В.В., Шешницан С.С. К вопросу об изучении эмиссии парниковых газов из почвы под лесными полезащитными насаждениями в Каменной Степи. Актуальные вопросы развития идей В.В. Докучаева в XXI веке. Развитие аграрной науки на современном этапе: Материалы Международной научно-практической конференции и Всероссийской школы молодых ученых и специалистов, посвященных 130-летию организации "Особой экспедиции Лесного департамента по испытанию и учету различных способов и приемов лесного и водного хозяйства в степях южной России". В 2-х частях, Каменная Степь, 14–16 июня 2022 года.

Том Часть 1. Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство Ритм", 2022. С. 74-77. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49712609>.

9. Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Сауткина М.Ю., Титова Т.В. Эколого-агрохимическая оценка почв Каменной степи под лесным ценозом. Известия вузов. Лесной журнал. 2021;5:76-91. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46809493>.

10. Kramareva T.N., Gorbunova N.S., Tikhonova E.N., Gromovik A.I., Kulikova E.V. Features of the migration of heavy metals in the forest landscapes of the Kamennaya steppe: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Forestry Forum "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions"". 2021:12021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012021...>

11. Mingareeva E., Aparin B., Sukhacheva E., Sanzharova N., Lazareva M., Terleev V., Akimov L. Content of radionuclides in soils of the Voronezh region. Technological Advancements in Construction. 2022;180:1-12. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8_1).

12. Кирюшин В.И. Экологические функции ландшафта. Почвоведение. 2018;1:17–25. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32312331>.

13. Olson K.R., Gennadiev A.N. Dynamics of soil organic carbon storage and erosion due to land use change (Illinois, USA). Eurasian Soil Science. 2020;4(53):436-445. <https://doi.org/10.1134/S1064229320040122>.

14. Сауткина М.Ю., Чевердин Ю.И. Микробиологическая оценка состояния почвенного покрова агролесомелиоративных ландшафтов Каменной Степи. Известия вузов. Лесной журнал. 2019;6:62–78. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41479910>.

15. Сушко С.В., Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Кудеяров В.Н. Эмиссия CO<sub>2</sub>, микробная биомасса и базальное дыхание чернозема при различном землепользовании. Почвоведение. 2019;9:1081–1091. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39149002>.

16. Кудеяров В.Н. Дыхание почв и биогенный сток углекислого газа на территории России (аналитический обзор). Почвоведение. 2018;6:643–658. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35102037>.

17. Кутовая О.В., Гребенников А.М., Тхакахова А.К., Исаев В.А., Гармашов В.М., Беспалов В.А., Чевердин Ю.И., Белобров В.П. Изменение почвенно-биологических процессов и структуры микробного сообщества агрочерноземов при разных способах обработки почвы. Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2018;92:35-61. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35011654>.

18. Хитров Н.Б., Хайдапова Д.Д. Вязкоупругое поведение вертикального солонца Каменной степи // Почвоведение. 2019;7:843–858. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38237125>.

19. Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И., Роговнева Л.В. Двумерное распределение свойств вертикального солонца микрорельефом гильгай в Каменной степи. Почвоведение. 2018;11:1285–1298. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36416462>.

20. Khitrov N., Smirnova M., Lozbenov N., Levchenko E., Gribov V., Kozlov D., Rukhovich D., Kalinina N., Koroleva P. Soil cover patterns in the forest-steppe and steppe zones of the east European plain. Soil science annual. 2019;3(70):198-210. <https://doi.org/10.2478/ssa-2019-0018>.

21. Щеглов Д. И., Громовик А. И, Горбунова Н. С. Основы химического анализа почв. 2019:332. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42440294>.

22. Плеханова И. О., Золотарева О. А. Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами. Агрохимия. 2020;10:79-88. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43961939>.

23. Chernova O. V., Bezuglova O. S. Use of background concentrations of heavy metals for regional monitoring of soil contamination by the example of Rostov oblast. Eurasian Soil Sci. 2019;52(8):1007. <https://doi.org/10.1134/S1064229319080040>.

24. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Burachevskaya M. V., Bauer T. V., Sushkova S. N. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. *MethodsX*. 2018; 5:217-226. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>.

25. Vodyanitskii Y., Minkina T., Bauer T. Method for calculation the selectivity of reagents extracting heavy metals mobile compounds from soil. *Applied Geochemistry*. 2020;116:104570. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104570>.

26. Mitra S., Chakraborty A. J., Tareq A. M., Emran T. B., Nainu E., Khusro A., Abubakr M. I., Khandaker M. U., Osman H., Alhumaydhi F. A., Simal-Gandara J. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity *Journal of King Saud University. Science*. 2022:101865. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>.

## References

1. Abakumov E.V., Poljakov V.I., Chukov S.N. Podhody i metody izuchenija organicheskogo veshhestva pochv karbonovyh poligonov Rossii (obzor). *Pochvovedenie*. 2022;7:773–786. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48621435>.

2. Zhidkin A., Fomicheva D., Yurova A., Ivanova N., Dostál T., Krása J., Komissarov M. A detailed reconstruction of changes in the factors and parameters of soil erosion over the past 250 years in the forest zone of European Russia (Moscow region). *International Soil and Water Conservation Research*. 2022;1(10):149-160. URL DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.003>

3. Frolov P., Shanin V., Zubkova E., Bykhovets S., Grabarnik P. CAMPUS-S – The model of ground layer vegetation populations in forest ecosystems and their contribution to the dynamics of carbon and nitrogen. I. Problem formulation and description of the model. *Ecological Modelling*. 2020;431: 109184. URL DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109184>.

4. Kramareva T.N., Tikhonova E.N., Gromovik A.I., Gorbunova N.S., Korolev V.A. Influence of various tree species on the properties of soils in the "Kamennaya steppe": IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Forestry Forum "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions"". 2021:12020. URL DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012020>.

5. Chendev Yu. G., Gennadiev A. N., Lukin S. V., Soer T. D., Zazdravnykh E. A., Belevantsev V. G., Smirnova M. A. Izmenenie lesostepnykh chernozemov pod vliyaniem lesopolos na yuge Srednerusskoy vozvysheynosti. *Pochvovedenie*. 2020;8:934–947. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42994976>.

6. Wu Y., Wang Q., Wang H., Wang W., Han S. Shelterbelt Poplar Forests Induced Soil Changes in Deep Soil Profiles and Climates Contributed Their Inter-site Variations in Dryland Regions, Northeastern China. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10. URL DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2019.00220>.

7. Wu Y., Wang W., Wang Q., Zhong Z., Wang H., Yang Y. Farmland Shelterbelt Changes in Soil Properties: Soil Depth-Location Dependency and General Pattern in Songnen Plain, Northeastern China. *Forests*. 2023;14(3):584 URL DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/f14030584>.

8. Chukhlebova V.V., Sheshnitsan S.S. K voprosu ob izuchenii emissii parnikovykh gazov iz pochvy pod lesnymi polezashchitnymi nasazhdeniyami v Kamennoy Stepi. Aktual'nye voprosy razvitiya idey V.V. Dokuchaeva v XXI veke. Razvitie agrarnoy nauki na sovremennom etape: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i Vserossiyskoy shkoly molodykh uchenykh i spetsialistov, posvyashchennykh 130-letiyu organizatsii "Osoboy ekspeditsii Lesnogo departamenta po ispytaniyu i uchetu razlichnykh sposobov i priemov lesnogo i vodnogo khozyaystva v stepyakh yuzhnoy Rossii". V 2-kh chastyakh, Kamennaya Step', 14–16 iyunya 2022 goda. Tom Chast' 1. Moskva: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Izdatel'stvo Ritm", 2022. S. 74-77. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49712609>.

9. Cheverdin Ju.I., Bepalov V.A., Sautkina M.Ju., Titova T.V. Jekologo-agrohimicheskaja ocenka pochv Kamennoj stepi pod lesnym cenozom. *Izvestija vuzov. Lesnoj zhurnal*. 2021;5:76-91. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46809493>.
10. Kramareva T.N., Gorbunova N.S., Tikhonova E.N., Gromovik A.I., Kulikova E.V. Features of the migration of heavy metals in the forest landscapes of the Kamennaya steppe: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "International Forestry Forum "Forest Ecosystems as Global Resource of the Biosphere: Calls, Threats, Solutions"". 2021:12021. URL DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012021>.
11. Mingareeva E., Aparin B., Sukhacheva E., Sanzharova N., Lazareva M., Terleev V., Akimov L. Content of radionuclides in soils of the Voronezh region. *Technological Advancements in Construction*. 2022;180:1-12. URL: DOI: [10.1007/978-3-030-83917-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83917-8_1).
12. Kirjushin V.I. Jekologicheskie funkcii landshafta. *Pochvovedenie*. 2018;1:17–25. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32312331>.
13. Olson K.R., Gennadiev A.N. Dynamics of soil organic carbon storage and erosion due to land use change (Illinois, USA). *Eurasian Soil Science*. 2020;4(53):436-445. URL: DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229320040122>.
14. Sautkina M.Ju., Cheverdin Ju.I. Mikrobiologicheskaja ocenka sostojanija pochvennogo pokrova agrolesomieliorativnyh landshaftov Kamennoj Step. *Lesnoj zhurnal*. 2019;6:62–78. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41479910>.
15. Sushko S.V., Anan'eva N.D., Ivashenko K.V., Kudejarov V.N. Jemissija SO<sub>2</sub>, mikrobnaja biomassa i bazal'noe dyhanie chernozema pri razlichnom zemlepol'zovanii. *Pochvovedenie*. 2019;9:1081–1091. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39149002>.
16. Kudejarov V.N. Dyhanie pochv i biogennyj stok uglekislogo gaza na territorii Rossii (analiticheskij obzor). *Pochvovedenie*. 2018;6:643–658. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35102037>.
17. Kutovaja O.V., Grebennikov A.M., Thakahova A.K., Isaev V.A., Garmashov V.M., Bepalov V.A., Cheverdin Ju.I., Belobrov V.P. Izmenenie pochvenno-biologicheskikh processov i struktury mikrobnogo soobshhestva agrochernozemov pri raznyh sposobah obrabotki pochvy. *Bjulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2018;92:35-61. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35011654>.
18. Hitrov N.B., Hajdapova D.D. Vjazkouprugoe povedenie vertikovogo solonca Kamennoj stepi // *Pochvovedenie*. 2019;7:843–858. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38237125>.
19. Hitrov N.B., Cheverdin Ju.I., Rogovneva L.V. Dvumernoe raspredelenie svojstv vertikovogo solonca smikrorel'efom gil'gaj v Kamennoj stepi. *Pochvovedenie*. 2018;11:1285–1298. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36416462>.
20. Khitrov N., Smirnova M., Lozbenev N., Levchenko E., Gribov V., Kozlov D., Rukhovich D., Kalinina N., Koroleva P. Soil cover patterns in the forest-steppe and steppe zones of the east European plain. *Soil science annual*. 2019;3(70):198-210. URL: DOI: <https://doi.org/10.2478/ssa-2019-0018>.
21. Scheglov D. I., Gromovik A. I., Gorbunova N. S. Osnovy himicheskogo analiza pochv. 2019:332. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42440294>.
22. Plehanova I. O., Zolotareva O. A. Jekologicheskoe normirovanie sostojanija pochv, zagrijaznennyh tjazhelymi metallami. *Agrohimiya*. 2020;10:79-88. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43961939>.
23. Chernova O. V., Bezuglova O. S. Use of background concentrations of heavy metals for regional monitoring of soil contamination by the example of Rostov oblast. *Eurasian Soil Sci*. 2019;52(8):1007. URL: DOI: [10.1134/S1064229319080040](https://doi.org/10.1134/S1064229319080040).
24. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Burachevskaya M. V., Bauer T. V., Sushkova S. N. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. *MethodsX*. 2018; 5:217-226. URL: DOI: [10.1016/j.mex.2018.02.007](https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007).

25. Vodyanitskii Y., Minkina T., Bauer T. Method for calculation the selectivity of reagents extracting heavy metals mobile compounds from soil. *Applied Geochemistry*. 2020;116:104570. URL: DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104570.

26. Mitra S., Chakraborty A. J., Tareq A. M., Emran T. B., Nainu E., Khusro A., Abubakr M. I., Khandaker M. U., Osman H., Alhumaydhi F. A., Simal-Gandara J. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity *Journal of King Saud University – Science*. 2022:101865. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>.

### Сведения об авторах

✉ *Тихонова Елена Николаевна* – кандидат биол. наук, зав. кафедрой 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/0000-0002-9039-9822>, e-mail: [tichonova-9@mail.ru](mailto:tichonova-9@mail.ru)

*Горбунова Надежда Сергеевна* – кандидат биол. наук, доцент, 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* – кандидат биол. наук, доцент кафедры 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).

*Одноралов Геннадий Алексеевич* – кандидат биол. наук, доцент кафедры 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/0000-0002-7154-6807>, e-mail: [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru)

### Information about the authors

✉ *Elena N. Tikhonova* – Cand. Sci (Biol.), assistant professor, Head of Department of Landscape Architecture and Soil Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>, e-mail: [tichonova-9@mail.ru](mailto:tichonova-9@mail.ru)

*Nadezhda S. Gorbunova* – Cand. Sci (Biol.), assistant professor, Voronezh State University, Universitetskaya square, 1, Voronezh city, 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.), assistant professor of Department of Landscape Architecture and Soil Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8027-855X>, e-mail: [sheshnitsan@gmail.com](mailto:sheshnitsan@gmail.com).

*Gennadiy A. Odnorolov* – Cand. Sci. (Biol.), assistant professor of Department of Landscape Architecture and Soil Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7154-6807>, e-mail: [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

# ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

**2023 Том 13 № 3 (51)**

Подписано в печать 30.11.2023. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет XX.XX.2023. Цена р.

Усл. печ. л. 31,25. Уч.-изд. л. 52,3. Тираж 1000 экз. Заказ

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)

Отпечатано в Участке оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

# LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific journal

**2023 Vol. 13 № 3 (51)**

Signed to be published 30.11.2023. Format 60×90 1/8.

Publication date XX.XX.2023. Price rub.

Cond. print. sh. 31,25. Acc.-print. sh. 52,3. Printing 1000 copies. Order

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»

Timiryazeva 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

FSBEI HE «VSUFT»

Dokuchaeva str., 10, Voronezh 394087