

# ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал  
2024 Том 14 № 2 (54)

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., академик 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 Мастранджело (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. Седлячик (Словакия)  
д-р наук М. Ахмади-Афзади (Иран)  
д-р наук, проф. В. Иветич (Сербия)  
д-р наук, проф. Кью-Сак Кэнг (Республика Корея)  
д-р наук А. Монтагноли (Италия)  
д-р наук Янг Пэнг (КНР)  
д-р наук, проф. З. Говедар (Босния и Герцеговина)  
д-р наук, проф. А. Хэлуфи (Алжир)  
д-р наук, проф. К. Палагиану (Румыния)

**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», 2024

# ***LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL***

Scientific Journal

**2024 Vol. 14 № 2 (54)**

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 academician A.A. Martynyuk (Russia)  
Dr., prof. A.A. Sirin (Russia) 2012-2023  
Dr., prof. D.N. Afonichev (Russia)  
Dr., prof. E.V. Ageev (Russia)  
Dr., prof. L.I. Belchinskaya (Russia)  
Dr., prof. N.N. Matveev (Russia)  
Dr., prof. S.M. Matveev (Russia)  
Dr., prof. A.A. Gusev (Russia)  
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. Tsypuk (Russia)  
Dr., prof. P. Tylek (Poland)  
Dr., prof. O.N. Burmistrova (Russia)  
Dr., prof. I.V. Grigoriev (Russia)  
Dr., prof. A.S. Manaenkov (Russia)  
Dr., prof. V.V. Rubtsov (Russia)  
Dr., prof. V.S. Syunev (Russia)  
Dr., prof. N.N. Kharchenko (Russia)  
Dr. Clissia Barboza Mastrangelo (Brazil)  
Dr. S.V. Rabko (Belarus)  
Prof. Zhou Dingguo (PRC)  
Dr., prof. A. Marcomini (Italy)  
Dr., prof. V. Podrazsky (Czech Republic)  
Dr., prof. N. Bilir (Turkey)  
Dr., prof. J. Sedliacik (Slovakia)  
Dr. M. Ahmadi-Afzadi (Iran)  
Dr., prof. V. Ivetic (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 repro-  
duced 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», 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

**И.Ю. Исаков.** Теоретические предпосылки создания и некоторые практические результаты изучения генофонда берёзы в Воронежской области..... 5

### ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

**Т.П. Деденко, Е.Н. Тихонова, Т.А. Малинина.** Сохранность и особенности роста лесных культур на мело-мергельных техногенных почвах Курской области 20

**М.В. Ермакова.** Структурно-функциональная организация естественных молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на 9-летней вырубке сосняка брусничникового Среднего Урала 36

**В.И. Лисицын, Т.П. Новикова, А.И. Новиков.** Динамика роста хвойных древостоев *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. и *Pinus sibirica* Du Tour: модифицированная модель 54

**Р.А. Осипенко, А.Е. Осипенко, Н.М. Ушакова, А.С. Новожилов.** Формирование растительности на рекультивированном карьере по добыче глины в условиях Средне-Уральского таежного района (на примере карьера в черте города Екатеринбург) 70

**В.А. Славский, Г.И. Славская.** Межвидовая гибридизация орехов рода *Juglans* в Воронежской области 88

**В.А. Усольцев, Н.И. Плюха, И.С. Цепордей.** Региональное ранжирование базисной плотности запаса стволовой древесины у лиственных древесных видов Евразии 103

### ТЕХНОЛОГИИ.

#### МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

**Д.С. Богданов, А.В. Попикова, И.Д. Евсиков, С.К. Попиков, А.А. Полумиско.** Кинематический и динамический анализ механизма подъема манипулятора сортировочного механизма, оснащенного гидромеханическим демпфером, на основе методов Эйлера и Рунге-Кутты 127

**С.П. Глушков, Д.И. Бояджиев, А.С. Черных, П.И. Попиков, Д.Н. Афоничев, В.В. Абрамов, Д.А. Полукаров, С.И. Савченко.** Исследование эколого-экономических параметров работы машины Mounty-4000 на первичной транспортировке древесины в Республике Болгария 144

## CONTENTS

### NATURAL SCIENCES AND FOREST

**I.Yu. Isakov.** Theoretical prerequisites for the creation and some practical results of studying the birch gene pool in the Voronezh region..... 5

### NATURE MANAGEMENT

**T.P. Dedenko, E.N. Tikhonova, T.A. Malinina** Preservation and features of growth of forest crops on chalk-marl technogenic soils of the Kursk region 20

**M.V. Ermakova.** Structural and functional organization in natural young stand of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the 9-aged cuttings of *Pinetum vaccinosum* located on the Middle Ural 36

**V.I. Lisitsyn, T.P. Novikova, A.I. Novikov** Growth dynamics of *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. and *Pinus sibirica* Du Tour coniferous stands: modified model 54

**R.A. Osipenko, A.E. Osipenko, N.M. Ushakova, A.S. Novozhilov.** Formation of vegetation at a reclaimed clay quarry in the Middle Ural taiga forest area (on the example of a quarry in Yekaterinburg) 70

**V.A. Slavskiy, G.Iv. Slavskaya.** Interspecific hybridization of nuts of the genus *Juglans* in the Voronezh region 88

**V.A. Usoltsev, N.I. Plyukha, I.S. Tsepordey.** Regional ranking of the basic density of the stem wood in deciduous tree species of Eurasia 103

### TECHNOLOGIES.

#### MACHINERY AND EQUIPMENT

**D.S. Bogdanov, A.V. Popikova, I.D. Evsikov, S.K. Popikov, A.A. Polumisko.** Kinematic and dynamic analysis of the lifting mechanism of a sorting truck manipulator equipped with a hydromechanical damper based on Euler and Runge-Kutta methods 127

**S.P. Glushkov, D.I. Boyadzhiev, A.S. Chernykh, P.I. Popikov, D.N. Afonichev, V.V. Abramov, D.A. Polukarov, S.I. Savchenko.** Study of the environmental and economic parameters of the Mounty-4000 machine for primary wood transportation in the Republic of Bulgaria 144

- О.Р. Дорняк, Л.В. Маркова, П.В. Танчук, С.К. Попиков.** Динамическое нагружение элементов гидравлической системы манипулятора лесотранспортной машины при выравнивании рамы опорно-поворотного устройства 168
- Д.Ю. Дручинин, М.А. Попов, С.В. Зимарин, А.И. Третьяков.** Оптимизация параметров лесного плуга для образования микроповышений на основе множественного регрессионного анализа 188
- А.Н. Заикин, В.В. Сиваков, В.А. Зеликов, А.С. Чуйков, А.И. Новиков, В.В. Стасюк.** Автоматизированное оперативное управление лесосечными работами: методологический анализ 204
- А.С. Лоренц, А.В. Прохоров, О.И. Григорьева, И.В. Григорьев, Г.А. Калита, В.А. Морковин.** К вопросу о неравномерности уровней почвенно-грунтовых вод на примере Архангельской области в контексте использования установок водопонижения при тушении лесных пожаров 227
- В.О. Никонов, В.И. Посметьев, В.В. Посметьев, В.А. Зеликов.** Имитационное моделирование резонансных явлений при работе рекуперативных гидравлических амортизаторов в подвесках прицепных звеньев лесовозных автопоездов 239
- В.И. Посметьев, В.О. Никонов, В.В. Посметьев, В.А. Зеликов.** Имитационное моделирование работы рекуперативных электромагнитных амортизаторов, установленных в подвеске лесовозного автопоезда 260
- А.Т. Рыбак, П.И. Попиков, Д.Ю. Дручинин, К.Г. Хоменко, С.К. Попиков.** Моделирование работы механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода 280
- С.В. Фокин, П.Ю. Медведева, В.П. Попиков.** Технико-экономический анализ положений сквозной технологии плантационного лесовыращивания 295
- O.R. Dornyak, L.V. Markova, P.V. Tanchuk, S.K. Popikov.** Dynamic loading of the hydraulic system elements for the timber transport machine manipulator during alignment of the frame of the pivoting device 168
- D.Yu. Druchinin, M.A. Popov, S.V. Zimarin, A.I. Tretyakov.** Optimization of the forest plow parameters for receiving microhills based on multiple regression analysis 188
- A.N. Zaikin, V.V. Sivakov, V.A. Zelikov., A.S. Chuikov, A.I. Novikov, V.V. Stasyuk.** Automatized management of logging operations: a methodological analysis 204
- A.S. Lorentz, A.V. Prokhorov, O.I. Grigoreva, I.V. Grigorev, G.A. Kalita, V.A. Morkovin.** On the issue of uneven groundwater levels based on Arkhangelsk region in the context of the dewatering installations used for extinguishing forest fires 227
- V.O. Nikonov, V.I. Posmetev., V.V. Posmetev, V.A. Zelikov.** Simulation modeling of resonance phenomena during the operation of regenerative hydraulic shock absorbers in the suspensions of trailing links of timber road trains 239
- V.I. Posmetev, V.O. Nikonov, V.V. Posmetev, V.A. Zelikov.** Simulation modeling of the operation of regenerative electromagnetic shock absorbers installed in the suspension of a timber road train 260
- A.T. Rybak, P.I. Popikov, D.Y. Druchinin., K.G. Khomenko, S.K. Popikov.** Modeling of work process of the column rotation mechanism of the auto-sortiment truck manipulator, taking into account the volumetric rigidity of the energy-saving hydraulic drive 280
- S.V. Fokin, P.Yu. Medvedeva, V.P. Popikov** Techno-economic analysis of the provisions of end-to-end plantation silviculture technology 295


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/1>

УДК 630\*385+631.529



## Теоретические предпосылки создания и некоторые практические результаты изучения генофонда берёзы в Воронежской области

Игорь Ю. Исаков ✉, [labgen@vglta.vrn.ru](mailto:labgen@vglta.vrn.ru)  0000-0003-2927-3275

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

В соответствии с Национальной целью «Экологическое благополучие» сформулированы и обоснованы 17 направлений, по которым проводятся и планируется проводить исследования на объектах *ex situ* берёзы F<sub>1</sub> и F<sub>2</sub>. Изучалась изменчивость роста в высоту семенного потомства и самоопыления на продуктивность (рост в высоту) и приживаемость на ранних стадиях онтогенеза у интродуцированных видов берёз, берёзы маньчжурской (*Betula mandshurica* (Regel) Nakai) – диплоид, 2n=2x=28, берёзы тополелистной (*Betula populifolia* Marshall) – диплоид, 2n=2x=28 и берёзы ильмолистной (*Betula ulmifolia* Cham.) – гексаплоид, 2n=6x=84. Интерес к этим видам вызван тем, что они являются разноплоидными, берёза ильмолистная имеет 6 гаплоидных хромосомных наборов. Поскольку приживаемость саженцев является одной из главных характеристик при создании лесных культур, был проведён анализ сохранности деревьев берёзы ильмолистной: 50 % при самоопылении и 81,25 % – при свободном опылении. Даны краткая история терминологии этих видов, вариабельность их признаков продуктивности на примере роста в двух-, трёх-, четырёх-, пяти- и шестилетнем возрасте, а также сохранности некоторых из них. Обнаружено явление «обратной» инбридинговой депрессии для полиплоидного интродуцированного вида берёзы – берёзы ильмолистной. Выявленная изменчивость по лидирующему типу роста системы размножения у этих интродуцированных видов берёз показывает перспективность селекционной работы с полиплоидным видом – берёзой ильмолистной.

**Ключевые слова:** интродукция, онтогенез, рост в высоту, берёза маньчжурская (*Betula mandshurica* (Regel) Nakai), берёза тополелистная (*Betula populifolia* Marshall), берёза ильмолистная (*Betula ulmifolia* Cham.)

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-64-00036, <https://rscf.ru/project/22-64-00036/>.

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


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

**Для цитирования:** Исаков, И. Ю. Теоретические предпосылки создания и некоторые практические результаты изучения генофонда берёзы в Воронежской области // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 5–19. – Библиогр.: с. 15–19 (32 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/1>.

Поступила 16.05.2024. Пересмотрена 06.06.2024. Принята 07.06.2024. Опубликована онлайн 17.06.2024.

Article

## Theoretical prerequisites for the creation and some practical results of studying the birch gene pool in the Voronezh region

Igor Yu. Isakov<sup>1</sup> ✉, labgen@vglta.vrn.ru  0000-0003-2927-3275

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

### Abstract

In accordance with the National Goal "Environmental Well-being", 17 directions have been formulated and justified in which research is being conducted and is planned to be conducted at ex situ birch F1 and F2 facilities. The variability of height growth of seed progeny and self-pollination on productivity (height growth) and survival in the early stages of ontogenesis in introduced birch species, Manchurian birch (*Betula mandshurica* (Regel) Nakai) – diploid,  $2n=2x=28$ , poplar-leaved birch (*Betula populifolia* Marshall) – diploid,  $2n=2x=28$  and elm-leaved birch (*Betula ulmifolia* Cham.) - hexaploid,  $2n=6x=84$  were studied. The interest in these species is caused by the fact that they are diverse, the elm-leaved birch has 6 haploid chromosome sets. Since the survival rate of seedlings is one of the main characteristics in the creation of forest crops, an analysis of the preservation of elm-leaved birch (*Betula ulmifolia* Cham.) trees was carried out, 50% with self-pollination and 81.25% with open pollination. A brief history of the terminology of these species, the variability of their productivity signs are given on the example of growth at two, three, four, five and six years of age, as well as the preservation of some of them. The phenomenon of "reverse" inbreeding depression has been revealed for a polyploid introduced species of *B. ulmifolia*. The revealed variability in the leading type of growth of the reproduction system in these introduced birch species shows the prospects of breeding work with polyploid species – *B. ulmifolia*.

**Keywords:** introduction, ontogenesis, growth in height, self-pollination, open-pollination, B. manchurian (*Betula mandshurica* (Regel) Nakai), B. poplar-leaved (*Betula populifolia* Marshall), B. elm-leaved (*Betula ulmifolia* Cham.)

**Funding:** the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-64-00036, <https://rscf.ru/project/22-64-00036>.

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

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

**For citation:** Isakov I. Yu. (2024). Theoretical prerequisites for the creation and some practical results of studying the birch gene pool in the Voronezh region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 5-19 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/1>.

**Received** 16.05.2024. **Revised** 06.06.2024. **Accepted** 07.06.2024. **Published online** 17.06.2024.

### Введение

Сохранение лесов и биологического разнообразия относится к задачам, выполнение которых характеризует достижение национальной цели «Экологическое благополучие» [Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»].

В «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» подчеркивается, что к числу наиболее перспективных направлений научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по лесной тематике, релевантных для России, в настоящий момент относится селекция, направленная на ускорение роста лесов, а также прочие технологии ухода и ускорения роста лесов.

В свою очередь, селекция, являющаяся практической ветвью лесной генетики, опирается на выявление и практическое использование формового, онтогенетического и внутривидового полиморфизма естественных и искусственных популяций древесных пород, их фенотипического разнообразия, обусловленного биотическими и абиотическими факторами. Длительные циклы размножения, разная фенология цветения, всхожесть семян, слабые корреляции между ювенильной и репродуктивной стадиями развития, изменения климата, требования рынка и возникающее давление вредителей и болезней создают для селекционеров серьезные проблемы. Таким образом, реализация и конечный результат программ селекции деревьев в значительной степени зависят от продолжительности цикла селекции. Чтобы максимизировать генетический выигрыш в единицу времени, D. Grattapaglia и др. (2018) [1] отмечают, что усилия в селекции деревьев должны быть направлены на два основных средства, с помощью которых можно сократить продолжительность селекционного цикла, а именно, ранний отбор и ускоренное размножение.

Теоретические предпосылки создания генофонда берёзы на объектах *ex situ* в Воронежской области.

1. Формирование банка данных ДНК генотипов видов, гибридов и селекционных форм берёз;

2. Формирование банка данных семян видов, гибридов и селекционных форм берёз;

3. Формирование банка данных пыльцы видов, гибридов и селекционных форм берёз;

4. Формирование банка данных коллекционного гербария видов, гибридов и селекционных форм берёз;

5. Апробация сортовыведения на примере использования теста на самофертильность/самостерильность у материнских деревьев местных и интродуцированных видов берёз.

6. Возможность получения неограниченного количества эксплантов для введения в культуру *in vitro* ограниченного количества фенотипически тестируемых перспективных генотипов;

7. Создание коллекции *in vitro* перспективных генотипов из биоресурсной коллекции *ex situ*;

8. Определение ОКС (общей комбинационной способности) и СКС (специфической комбинационной способности) у полученных генотипов, получение сибсов и полусибсов перспективных генотипов берёз;

9. Изучение взаимодействия «генотип-среда» деревьев (семей), имеющих одинаковое генетическое происхождение, произрастающих в разных эдафических условиях ( $F_2$ );

10. Изучение наследования количественных (рост в высоту, диаметр ствола, параметры волокон либриформа и т.д.) и качественных признаков (карельская берёза – наследование признака «карельскости») при вертикальном переносе генов (система «родители – потомки») у видов и гибридов берёзы;

11. Установление механизмов полиплоидизации на примере получения искусственных гибридов при скрещивании диплоидных и полиплоидных видов в этом таксономическом роде;

12. Изучение изменчивости количественных и качественных признаков при искусственном горизонтальном переносе генов (при инокуляции деревьев штаммами *Agrobacterium tumefaciens*);

13. Выявление засухоустойчивых деревьев (семей), полученных при семенной репродукции;

14. Определение морфометрических, цитологических, молекулярных характеристик и особенностей выращивания в культуре *in vitro* диплоидных, тетраплоидных и гибридных деревьев берёзы;

15. Проведение молекулярно-генетической паспортизации с помощью разных систем маркирования (разных видов молекулярных маркеров – индивидуально (онтогенетическом), семейственном, гибридном уровнях);

16. Изучение полученного пула как местных, так и интродуцированных видов берёз (берёза бузьянская, б. белокитайская, б. железная, б. лжеэрмана, б. маньчжурская, б. далекарлийская, б. вишнёвая, б. карельская, б. тополелистная, б. ильмолистная), а также их гибридов и создание на их основе географических культур;

17. Обоснование выбора лучших способов репродукции ценных генотипов берёз: i) – при семенном размножении; ii) – при клонировании привив-

кой (морфогенез); iii) при клонировании *in vitro* (ин-витрогенез); iv) – при клонировании корнями (ризо-генез).

Климатические условия, в которых существуют растительные и животные сообщества, подвержены глобальным вызовам, в том числе и таким, как медленное и неуклонное повышение температуры на нашей планете. Так, по данным [Всемирной Метеорологической Организации (WMO), 2024] глобальная средняя приземная температура в 2023 году была примерно на 1,45 ( $\pm 0,12$ ) °C выше среднего значения за годы наблюдений, а 2023 год стал самым теплым за все 174 года наблюдений. Был побит рекорд предыдущих самых теплых лет: 2016 года и 2020 года, и динамика повышения температуры продолжает быть устойчивой. С другой стороны, к потеплению климата на планете чувствительны такие признаки деревьев берёзы, как рост в высоту и фенология [2]. Глобальное потепление сказывается на развитии репродуктивных и вегетативных органов берёзы в Воронежской области. Так, И. Сапельникова (2023) [3] отмечает, что для древесно-кустарниковых видов Воронежского заповедника, в том числе и для берёзы, есть смещение современного наступления сроков начала цветения и зеленения на более ранние даты по сравнению с 40-ми годами прошлого века; также начало осенней окраски стало регистрироваться раньше у черёмухи, липы, берёзы и рябины.

Этот род образует полиплоидный ряд, представители которого могут быть идентифицированы с помощью молекулярных маркеров [4, 5], цитологическими и биотехнологическими методами [6]. Вместе с тем селекция с использованием маркеров может ускорить размножение, однако она неэффективна для отбора сложных количественных признаков у лесных деревьев [7].

Несмотря на то что береза имеет широкое распространение, определенные условия делают некоторые участки поверхности почвы более подходящими для её естественного возобновления. В дополнение к условиям влажности почвы решающее значение имеет наличие семян [8, 9].

С начала 80-х годов XX века произошло заметное усиление внимания к вопросам сохранения

генофондов и биологического разнообразия травянистых и древесных растений (включая редкие и исчезающие виды), которые также могут решаться с помощью интродукции [10]. Кроме того, сейчас происходит переоценка использования разных древесных видов в лесовосстановлении [11]. Род *Betula* L. включает приблизительно 60 видов [12], состоит из 4 подродов и 8 секций: подр. *Acuminata* (секц. *Acuminatae*), *Aspera* (секц. *Asperae* и *Lentae*), *Betula* (секц. *Apterocaryon*, *Betula*, *Costatae* и *Dahuricae*) и *Nipponobetula* (секц. *Nipponobetula*) [13]. Является лекарственным и медоносным растением [14]. Деревья этого рода широко исследуются на оценку запасов фитомассы и углерода для построения обобщенных моделей, в т.ч. мета-анализа [15].

В нашей стране широко представлены березы секции *Betula* (белые березы) и *Apterocaryon* (карликовые березы). Они исследуются на разных уровнях, в т.ч. и молекулярных. Молекулярные маркеры, используемые для изучения берёзы, могут дифференцировать виды по их адаптивности. Так, регион ITS 1–2 ядерной рДНК позволяет дифференцировать близкородственные виды берез *B. humilis* и *B. nana*, произрастающие на территории Среднего Урала. Популяции *B. nana* характеризуются большей изменчивостью данного региона в сравнении с *B. humilis*, что может свидетельствовать о более высокой адаптивности *B. nana* [16]. Также показано, что берёза чувствительна к бактериальной трансформации *Agrobacterium tumefaciens*, а высокий процент трансгенных растений березы, полученных при инфицировании, содержит базовые последовательности при использовании бинарных векторов [17]. Кроме того, при трансформации тем же способом с устойчивым к насекомым геном (*bgt*), количество трансгенных деревьев берёзы варьировало от одного до четырех, при общем количестве линий 26 [18, 19, 20].

У интродуцированных пород в качестве плюсовых отбирают плодоносящие деревья, отличающиеся высокой устойчивостью к новым климатическим условиям, лучшими показателями по росту, качеству ствола и другим селективируемым признакам [21]. Также ассортимент промышленно и экологиче-



ски ценных берез может быть обогащен за счет результатов селекционных работ по меж- и внутривидовой гибридизации [22].

При создании лесных культур сеянцы [23] берёзы повислой должны удовлетворять следующим требованиям ОСТ 56-98-93 (для лесостепной зоны), по возрасту – 1-2 года; по высоте – не менее 20 см.

Исследование, проведённое в старовозрастных лесах Чанбая (Китай), в котором плотность углерода изучалась дифференцированно: наземная часть деревьев, подземная (корни) и почва, показало следующее. В смешанном лесу (сосна-берёза) плотность углерода в каждом лесном компоненте увеличилась, и общая плотность углерода увеличилась с 233 до 317 т С га<sup>-1</sup>; в хвойном лесу содержание углерода в деревьях снизилось, но общая плотность углерода в лесу все равно увеличилась с 298 до 327 т С га<sup>-1</sup>; чистый березовый лес накопил много углерода в деревьях, но запас углерода в почве оставался относительно стабильным, а общая плотность углерода в нем увеличилась с 226 до 281 т/га<sup>-1</sup> [24].

В Воронежской области естественно произрастают два вида берёзы, диплоидная ( $2n=28$ ) берёза повислая и полиплоидная ( $4n=56$ ) берёза пушистая. Имеются сведения [25] о произрастании ещё одного вида, берёзы Литвинова. При создании лесных культур используется принцип биоразнообразия, заключающийся в избегании создания монокультур и в смешении двух или нескольких древесных пород, в основном, голосеменных и лиственных. Ранее [11] нами уже проводились работы по интродукции этих видов и в другом регионе Центрального Черноземья – в Орловской области. В опыте изучается рост в динамике трёх интродуцированных в Воронежскую область видов берёз – берёзы ильмолистной (*Betula ulmifolia*), берёзы тополелистной (*B. populifolia*) и б. маньчжурской (*B. mandshurica*).

Эти виды имеют разное применение. Так, из коры берёзы ильмолистной,  $2n=84$  (*Betula ulmifolia* Siebold et Zucc. In: Abb. Bayr. Acad. Wissensch. 4, 1846, 3: 228; Schneider C.K. In: Plantae Wilsonianae, 2:477-478; Васильев В.Н., 1942, Ботан. журн., 27, № 1-2 : 10; Замятин, 1951, В кн.: Дер. и куст. СССР, 2 : 292; Воробьев, 1968, Дикорастущ. дер. и куст. Дальн. Вост. : 75; Воробьев и др., 1974, Опред. высш. раст. Сахал. и Кур. о-ов : 145. *Betula grossa* var.

*ulmifolia*) выделяют салицилат, а экстракт коры этой берёзы значительно подавляет рост корней некоторых растений при выращивании на искусственной питательной среде с агаром. Результаты показали, что кора *B. grossa* может быть важна при аллелопатии, а салицилат может играть аллелохимическую роль [26].

Исследования, проведённые на берёзе тополелистной, имеющей диплоидный набор хромосом,  $2n=2x=28$  [27], (*Betula populifolia* Marshall, Arbust. Amer. 19. 1785) как индикаторе загрязнения городской среды [28], показали следующее. Распределение ресурсов между ростом и развитием в неоднородных городских эдафических условиях приводит к значительным различиям в темпах роста и плотности древесины для этой берёзы, что может оказать существенное влияние на С (углеродное) – моделирование для городских условий. Показана важность изучения потоков углерода вдоль таких эдафических градиентов, для лучшего определения баланса между процессами фотосинтеза и дыхания в урбанизированных районах.

Берёза маньчжурская, имеющая двойной набор хромосом,  $2n=2x=28$ , (*Betula alba* subsp. *mandshurica* Regel in Bull. Soc. Imp. Naturalistes Moscou 38(II): 399 (1865); *Betula alba* var. *mandshurica* (Regel) Franch. in Nouv. Arch. Mus. Hist. Nat., sér. 2, 7: 91 (1884); *Betula japonica* var. *mandshurica* (Regel) H.J.P. Winkl. in H.G.A. Engler (ed.), Pflanzenr., IV, 61: 78 (1904); *Betula latifolia* var. *mandshurica* (Regel) Nakai in Rep. Veg. Kamik.: 38 (1928); *Betula mandshurica* (Regel) Nakai in Bot. Mag. (Tokyo) 29: 42 (1915); *Betula platyphylla* var. *mandshurica* (Regel) H. Nara in J. Jap. Bot. 13: 385 (1937); *Betula platyphylla* subsp. *mandshurica* (Regel) Kitag. in Lin. Fl. Manshur.: 165 (1939); современная классификация (*Betula manshurica* (Regel.) Nakai), (*Betula pendula* subsp. *mandshurica* (Regel) Ashburner & McAll., 2013) является лесообразующей древесной породой на Дальнем Востоке, где она может замещаться очень сходной по фенотипу и биоэкологии берёзой плосколистной. Причем первая, несмотря на значительную протяженность ареала, считается гибридом. В настоящее время она отмечена в южной части Сихотэ-Алиня [29].

В ближайшей перспективе – отбор ценных форм у берёзы более точным и быстрым способом можно будет проводить с помощью генетических маркеров, необходимым шагом в создании которых является выявление мутаций посредством GBS (Генотипирования на основе Секвенирования) [30]. В фармацевтике синтезированные кумараты из берёзовых почек показали противомикробную активность в отношении *Staphylococcus epidermidis* при использовании большей, по сравнению с природными соединениями, концентрации [31].

Целью исследования является изучение роста на ранних этапах онтогенеза и выявление перспективных видов (семей) берёзы для интродукции в Воронежскую область на основе их динамики роста в живых коллекциях. При постановке цели решались следующие задачи: 1. Определить приживаемость при посадке на лесокультурную площадь интродуцированных видов берёз; 2. Охарактеризовать внутрисемейную изменчивость по росту в высоту изучаемых видов берёзы 3. Оценить видоспецифичные показатели высаженных саженцев берёзы.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследований*

В 1983 году был создан путём гибридизации и самоопыления был создан первый объект Биоресурсной коллекции селекционных форм, видов и гибридов берёзы - объект F1 в Воронежском государственном природном биосферном заповеднике им. В.М. Пескова, на котором испытывается рост и развитие 1570 деревьев разного генетического происхождения.

#### *Сбор данных*

В 1992 и 1995 г. на этом объекте по апробированной нами методике [32] также были проведены генетико-селекционные мероприятия и получено семенное потомство второго поколения, F2, которое в рендомизированных повторностях высажено в разных экологических условиях для изучения взаимодействия семья-генотип-среда. Географические координаты объекта F2: 52°03'50.97" с.ш., 39°12'59.24" в.д.; северная часть Воронежской области, Рамонский район, окрестности с. Князево. Методика получения растительного материала включает предварительный отбор деревьев, постановку пергаментных

изоляторов для предотвращения попадания чужеродной пыльцы с одновременным удалением мужских серёжек, этикетированием побегов, контролем прохождения цветения у рядом стоящих деревьев и сбор инбредных и гибридных семян. Семена от свободного опыления собирали одновременно.

#### *Анализ данных*

Семена интродуцированных берёз были собраны с материнских деревьев в дендрарии Семилукского лесопитомника ВНИИЛГИСбиотех в августе 1992 года. Посадка двухлетних саженцев производилась под меч Колесова на лесокультурную площадь в борозды. Замеры высот проводили мерным шестом и эклиметром.

### Результаты

По росту в ювенильном возрасте у интродуцированных в Воронежскую область трёх видов берёз – маньчжурской, тополелистной и ильмолистной. В табл. 1 представлена динамика роста интродуцированных берёз в Гремяченском лесничестве Воронежской области.

По этому количественному признаку при разных способах опыления (самоопыление, свободное опыление) испытывались 3 семьи берёзы маньчжурской (№ 2, № 12 и № 13), 3 семьи берёзы тополелистной (№ 1, № 7 и № 9) и 3 семьи берёзы ильмолистной (№ 11, № 12 и № 15), табл. 1. На основании этой таблицы у этих видов были отобраны наиболее контрастные значения по данному признаку самоопыление/свободное опыление и построены диаграммы, рис. 1 – б. маньчжурская № 13, рис. 2 – б. тополелистная № 1, рис. 3 – б. ильмолистная № 12.

Из рис. 1, 2 и 3 видно, что способ опыления материнского дерева дифференцированно влияет на рост диплоидных (берёза маньчжурская и б. тополелистная) и полиплоидных (б. ильмолистная) видов берёзы и в возрасте 6 лет у соответствующих видов были следующие показатели роста в высоту, со и св: 2,91 м и 1,89 м; 220,5 м и 172,3 м; 85,4 м и 192 м, соответственно.

Диплоидные интродуцированные виды берёз показывают лучший рост, и лучшую динамику роста на ранних стадиях онтогенеза (2-6 лет) при однократном самоопылении.

Средние высоты семей, полученные при самоопылении и свободном опылении у трех интродуцированных видов берез в 2-6 - летнем возрасте в Гремяченском лесничестве Воронежской области

Average family heights obtained by self-pollination and open pollination in 3 introduced birch species at 2-6 years of age in the Gremyachensk forestry of the Voronezh region

Номер дерева, происхождение Tree number, origin	Количество потомков Number of offsprings	2 года 2 years	3 года 3 years	4 года 4 years	5 лет 5 years	6 лет 6 years
Береза маньчжурская №2, со	16	39,4 ± 3,7	72,9 ± 6,5	111,4 ± 10,6	136,1 ± 12,9	155,4 ± 19,4
Береза маньчжурская №2, св	7	57,1 ± 12,7	93,6 ± 12,3	147,4 ± 12,1	182,1 ± 14,2	160,4 ± 32,7
Береза маньчжурская №12, со	13	71,7 ± 8,2	122,7 ± 8,8*	183,7 ± 8,9*	215,6 ± 12,2*	249,1 ± 22,5*
Береза маньчжурская №12, св	12	73,2 ± 10,1	70,7 ± 9,9	88,2 ± 9,9	101,1 ± 13,5	119,7 ± 13,9
Береза маньчжурская №13, со	32	67,5 ± 5,9	106,0 ± 6,3	150,2 ± 8,2	200,0 ± 10,7	291,0 ± 10,9*
Береза маньчжурская №13, св	21	69,2 ± 6,0	105,4 ± 8,2	147,1 ± 10,2	185,3 ± 11,6	189,6 ± 13,9
Б. тополелистная № 1, со	50	41,9 ± 2,7	95,1 ± 5,6	158,6 ± 7,7	195,2 ± 10,4	220,5 ± 10,9*
Б. тополелистная № 1, св	19	32,6 ± 2,7	83,0 ± 8,0	119,7 ± 9,6	161,6 ± 12,0	172,3 ± 16,2
Б. тополелистная № 4, со	42	45,6 ± 5,6	94,6 ± 4,4	136,6 ± 6,6	173,5 ± 9,3	194,5 ± 9,6
Б. тополелистная № 7, со	32	36,6 ± 3,9	84,8 ± 7,1	139,0 ± 10,1	183,4 ± 13,8	202,2 ± 15,3
Б. тополелистная № 7, св	12	37,9 ± 3,0	83,4 ± 7,0	122,2 ± 9,2	157,3 ± 9,2	168,5 ± 12,3
Б. тополелистная № 9, со	26	41,4 ± 2,9	102,5 ± 7,6	159,4 ± 10,9	208,1 ± 13,8	221,5 ± 13,7
Б. тополелистная № 9, св	22	42,7 ± 4,0	113,8 ± 9,5	172,7 ± 11,5	216,6 ± 14,5	235,6 ± 14,9
Б. ильмолистная № 11, со	5	33,0 ± 4,8	27,4 ± 7,0	51,2 ± 9,0	63,5 ± 7,8	65,8 ± 7,8
Б. ильмолистная № 11, св	4	49,0 ± 9,7	65,4 ± 11,4*	126,8 ± 28,1*	144,7 ± 28,3 *	129,5 ± 23,9*
Б. ильмолистная № 12, со	7	34,0 ± 4,9	40,7 ± 3,3	63,0 ± 7,0	83,1 ± 6,6	85,4 ± 11,3
Б. ильмолистная № 12, св	11	73,5 ± 9,7*	118,4 ± 10,0*	160,2 ± 13,4*	198,9 ± 19,5 *	192,0 ± 21,3*
Б. ильмолистная № 15, со	17	47,9 ± 6,0	51,9 ± 6,4	95,5 ± 10,4	115,2 ± 11,6	128,2 ± 11,1
Б. ильмолистная № 15, св	10	61,8 ± 5,2	81,9 ± 9,5	122,2 ± 12,9	156,3 ± 17,0	159,6 ± 18,2

Примечание: \* - различия между способами опыления статистически достоверны при P < 0,05.

Note: \* - differences between pollination methods are statistically significant at P < 0.05.

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

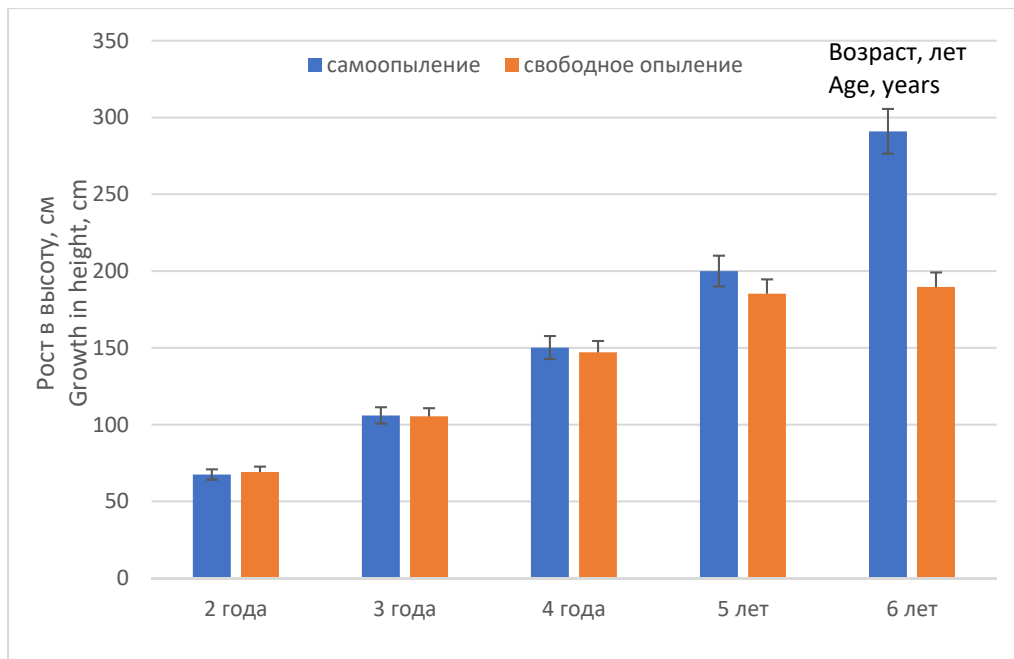


Рисунок 1. Динамика роста в высоту на ранних стадиях онтогенеза деревьев берёзы маньчжурской № 13 при разных способах опыления

Figure 1. The dynamics of height growth in the early stages of ontogenesis of Manchurian birch trees No. 13 with different pollination methods

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

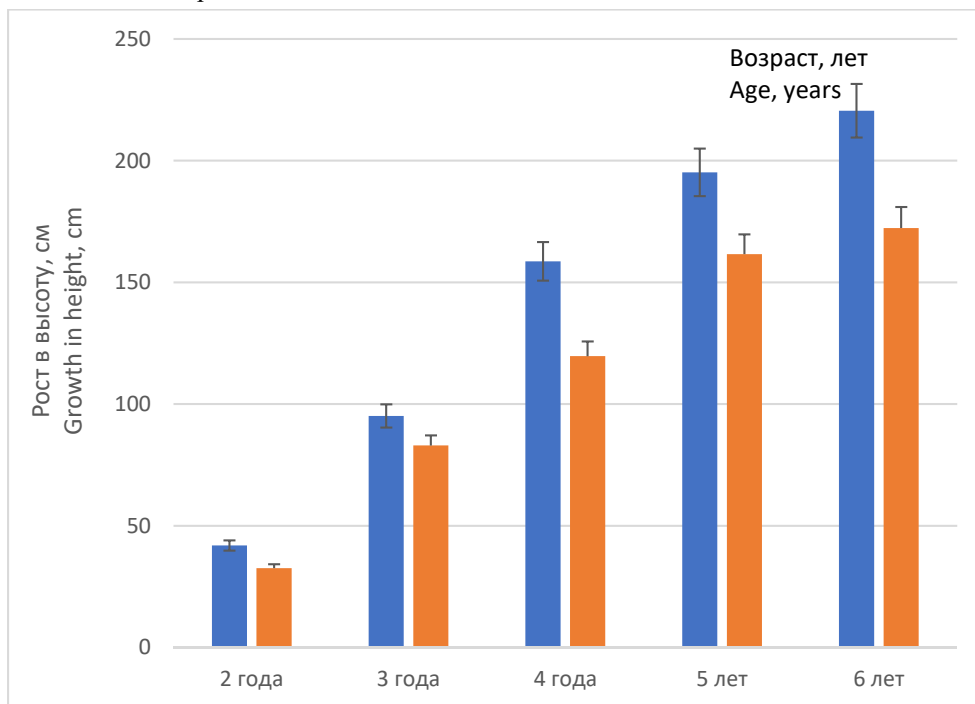


Рисунок 2. Динамика роста в высоту на ранних стадиях онтогенеза деревьев берёзы тополелистной № 1 при разных способах опыления

Figure 2. The dynamics of height growth in the early stages of ontogenesis of birch poplar trees No. 1 with different pollination methods

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

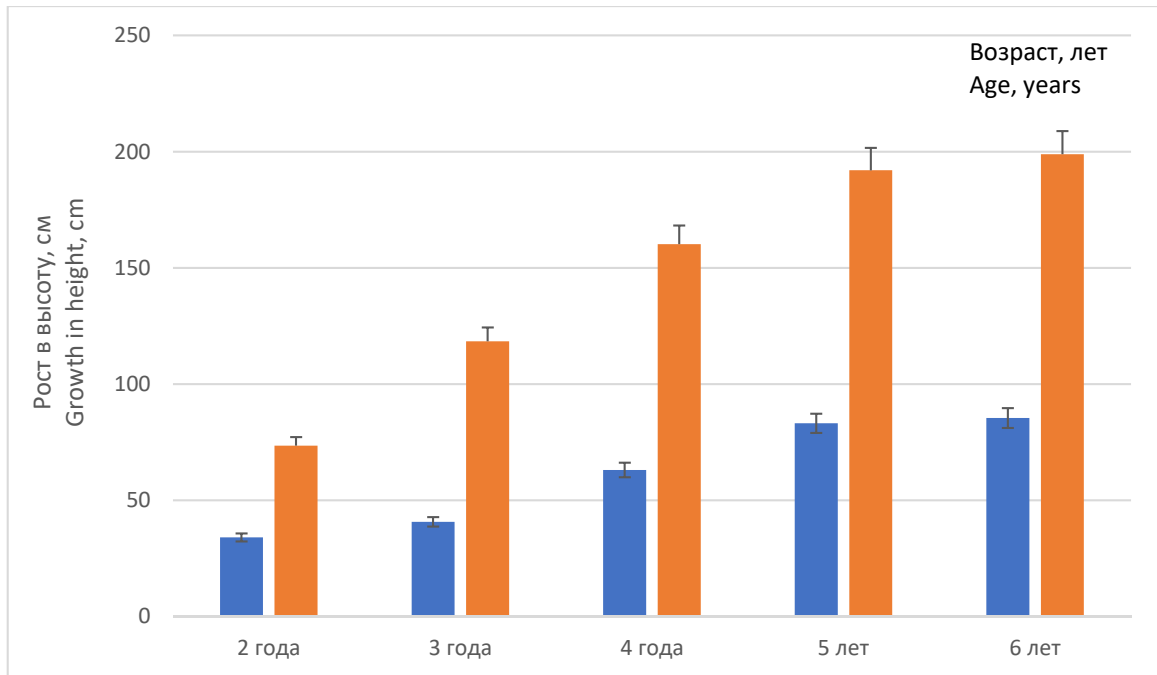


Рисунок 3. Динамика роста в высоту на ранних стадиях онтогенеза деревьев берёзы ильмолистной № 12 при разных способах опыления

Figure 3. The dynamics of height growth in the early stages of ontogenesis of birch elm-leaved trees No. 12 with different pollination methods

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

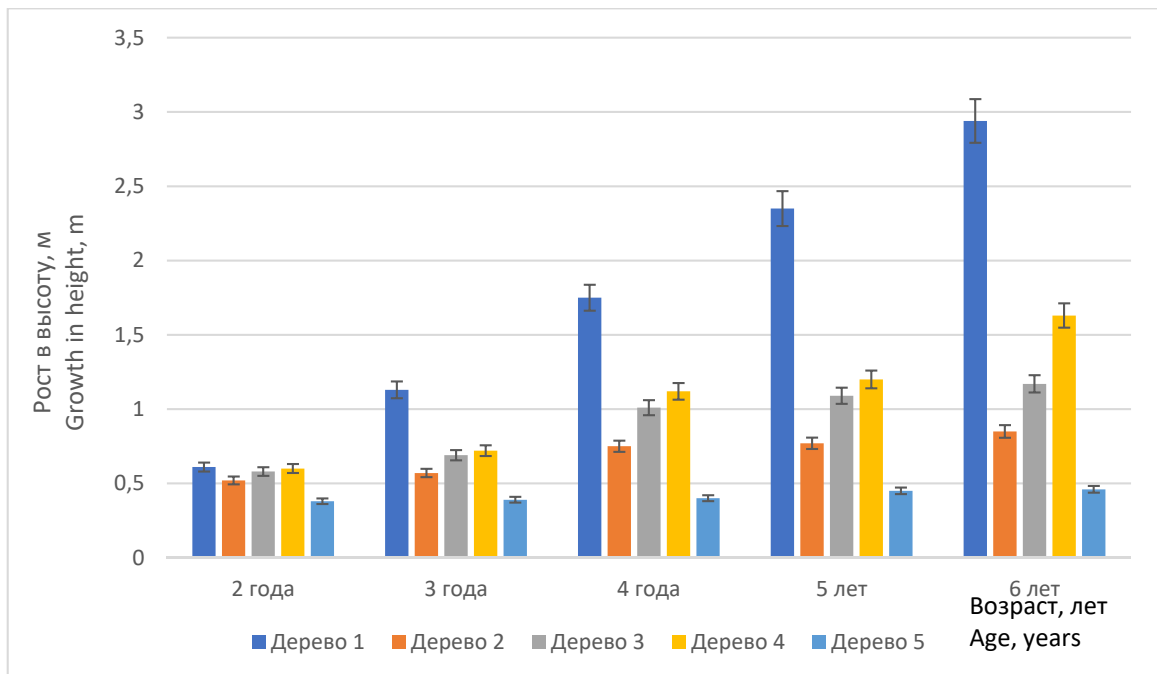


Рисунок 4. Динамика роста деревьев берёзы ильмолистной, полученных при разных способах опыления

Figure 4. Dynamics of growth of birch elm-leaved trees obtained by different pollination methods

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

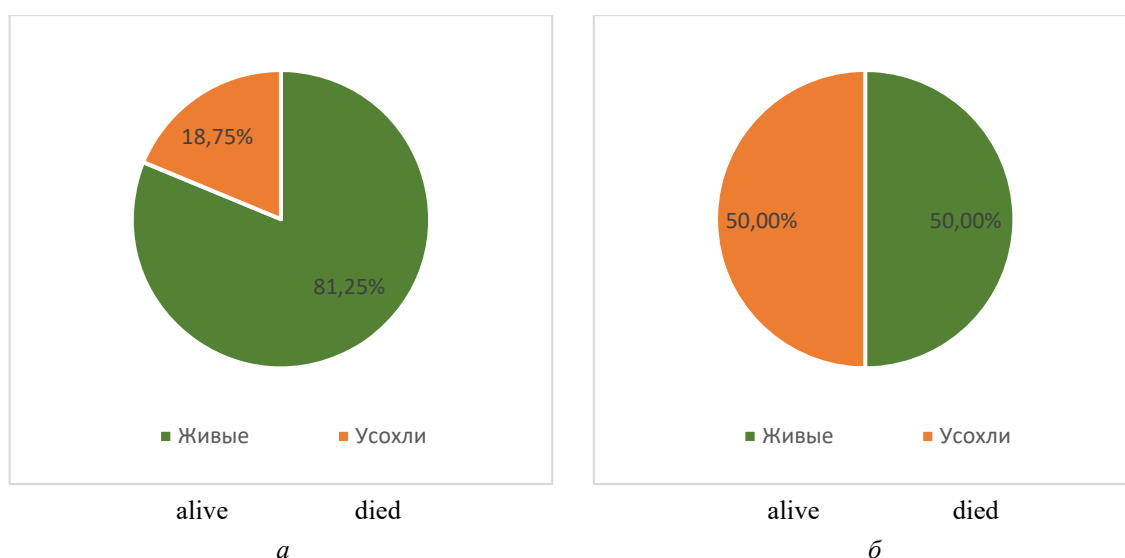


Рисунок 5. Сохранность семенного потомства деревьев б. ильмолистной: а) при свободном опылении; б) при самоопылении

Figure 5. Preservation of seed progeny of b. ulm-leaves trees: a) with open pollination; b) with self-pollination

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

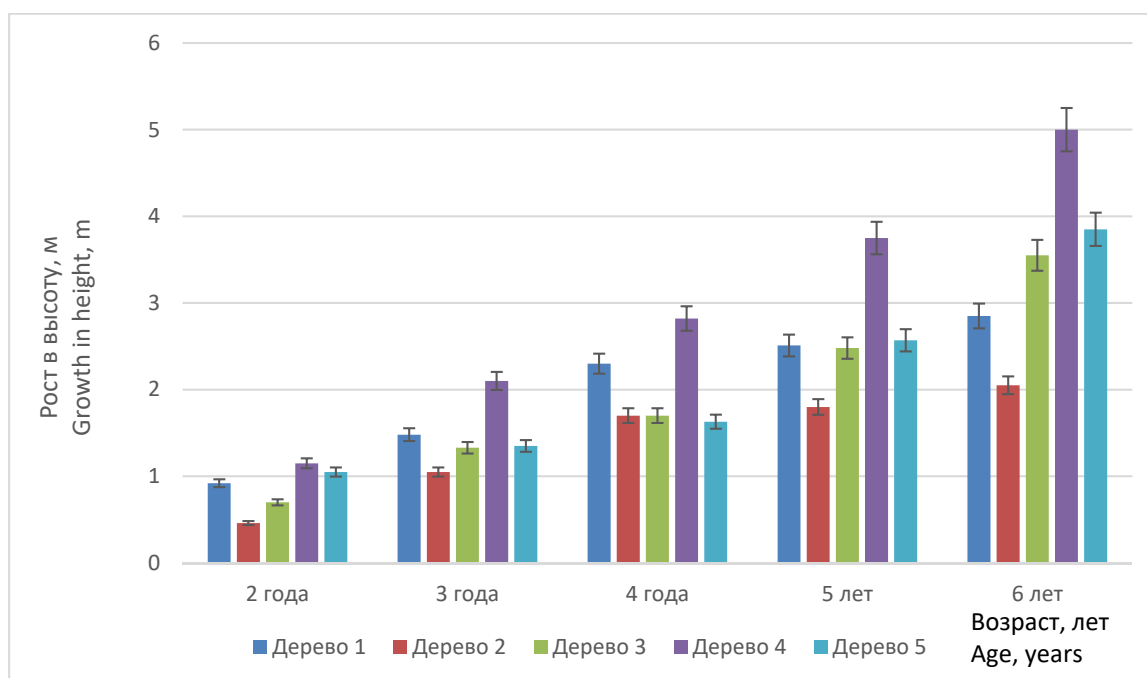


Рисунок 6. Динамика роста берёзы маньчжурской на ранних стадиях онтогенеза

Figure 6. Growth dynamics of the Manchurian birch in the early stages of ontogenesis

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

### Обсуждение

Из полученных данных видна видовая специфика по реакции интродуцентов на инбридинг в Воронежской области. Для семей берёзы маньчжурской и тополелистной просматривается положительное влияние однократного самоопыления на рост семенного потомства, в то время как для б. ильмолистной выявлена обратная зависимость: высота свободноопыленных деревьев значительно (более, чем в два раза) превосходит высоту самоопыленных деревьев.

На объекте F2, урочище Князево всего получен 21 сеянец берёзы ильмолистной следующего происхождения: от дерева № 8 – 1 шт., № 2 – 3 шт., на дереве № 5 было проведено самоопыление и получены сеянцы – 8 шт., от свободного опыления того же дерева получено 12 растений. До репродуктивного возраста сохранились 5 деревьев, 4 – от самоопыления. Их динамика роста показана на рис. 4. Обозначения: дерево 1 – семенное потомство дерева № 8; деревья 2,3,4,5 – семенное потомство дерева № 5, самоопыление.

Высота деревьев б. ильмолистной в возрасте 10 лет варьировала от 8,3 м до 1,4 м в урочище Князево и от 1,92 м до 1,3 м в 6 лет в Гремяченском лесничестве. Б. маньчжурская в возрасте 10 лет - от 9,3 м до 3,5 м в первом месте произрастания и от 2,91 м до 1,20 м - во втором. Берёза тополелистная испытывалась только в Гремяченском лесничестве и показала следующие результаты: от 2,35 м до 1,68 м в шестилетнем возрасте.

### Заключение

Таким образом, по результатам замеров среднесемейных значений роста среди трёх интродуцированных видов берёз лучшими показателями отличается рост б. маньчжурской, д. 13, полученных от самоопыления 2,91 м для Гремяченского лесничества и среди отдельных деревьев (ур. Князево) – д. 13, полученных от свободного опыления – 9,3 м (10 лет). Указанная семья дерева № 13 является перспективной для дальнейшей селекционной работы и получения высокопродуктивных насаждений этого интродуцированного вида. Лучшей продуктивностью, и плотностью углерода в штамбах, соответственно, среди испытанных интродуцентов – берёза маньчжурская. Полиплоидный вид – берёза ильмолистная показала хорошую сохранность деревьев, полученных при свободном опылении, 81,25% и гораздо меньшую, 50% - самоопыленных потомков (явление инбридинговой депрессии). Выявлена «обратная» инбридинговая депрессия по росту в высоту для интродуцированных берёз, заключающаяся в том, что семенное потомство (семьи) диплоидных интродуцированных видов берёз при самоопылении показывает статистически достоверно превышающий рост в высоту по сравнению со свободноопыленными семьями, в то время как семьи гексаплоидной берёзы ильмолистной характеризуются, наоборот, угнетённым ростом.

### Список литературы

1. Grattapaglia D., Silva-Junior O. B., Resende R. T., Cappa E. P., Müller B. S. F., Tan B., Isik F., Ratcliffe B., El-Kassaby Y. A. Quantitative Genetics and Genomics Converge to Accelerate Forest Tree Breeding. *Front. Plant Sci.* 2018; 9:1693. <http://doi.org/10.3389/fpls.2018.01693>.
2. Possen B. J. H. M., Rousi M., Keski-Saari S., Silfver T., Kontunen-Soppela S., Oksanen E., Mikola J. New evidence for the importance of soil nitrogen on the survival and adaptation of silver birch to climate warming 2021. *Ecosphere*, 12(5). <http://doi:10.1002/ecs2.3520>.
3. Сапельникова И. И. Оценка многолетних фенологических данных некоторых древесно-кустарниковых видов в Воронежском заповеднике // Труды Воронежского государственного заповедника. Вып. XXXI ; ФГБУ «Воронежский государственный заповедник». Воронеж : ООО «Цифровая полиграфия», 2023. С. 174–228. [http://doi:10.57007/9785907669321\\_2023\\_31\\_174](http://doi:10.57007/9785907669321_2023_31_174).
4. Belton S., Cubry P., Fox E., Kelleher C. T. Novel Post-Glacial Haplotype Evolution in Birch – A Case for Conserving Local Adaptation. *Forests*. 2021;12, 1246. <https://doi.org/10.3390/f120912>.

5. Anamthawat-Jónsson K. Hybrid introgression: the outcomes of gene flow in birch. *Science Asia*. 2019; 45: 203–211. <http://doi:10.2306/scienceasia1513-1874>.
6. Исаков И. Ю., Табацкая Т. М., Внукова Н. И., Машкина О. С., Михин В. И., Говедар З. Фенотипическая и генетико-селекционная оценка березы повислой (*Betula pendula* Roth) и березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) ex situ и in vitro // *Лесотехнический журнал*. 2023. Т. 13. № 2 (50). С. 25–42. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/2>.
7. Sharma U., Sankhyan H. P., Kumari A. *et al.* Genomic selection: a revolutionary approach for forest tree improvement in the wake of climate change. *Euphytica* 220, 9 2024. <https://doi.org/10.1007/s10681-023-03263-5>.
8. Anamthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Thórsson Æ.T., Jóhannsson M. H. Naturally occurring triploid birch hybrids from woodlands in Iceland are partially fertile. *New Forests*. 2021; 52: 659–678. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09816-z>.
9. Holmström E., Karlsson M., Nilsson U. (2017) Modeling birch seed supply and seedling establishment during forest regeneration. *Ecol Model* 352: 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.027>.
10. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Интродукция карельской берёзы: история, опыт и оценка перспектив // *Hortus Botanicus : международный электронный журнал ботанических садов*. 2023; 18: 310–331. URL: <http://elibrary.petrus.ru/books/68267>.
11. Миленная Л. А., Исаков И. Ю. Испытание потомств четырёх видов берёз в Орловской области // *Опытная база в лесной селекции : сб. науч. тр. Воронеж : НИИЛГиС, «Квадрат», 1995. С. 89–93. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25370733*.
12. Wang N., Mcallister H. A., Bartlett P. R., Buggs R. J. Molecular phylogeny and genome size evolution of the genus *Betula* (Betulaceae). 2016 *Ann. Bot.* 117, 1023–1035. <http://doi:10.1093/aob/mcw048>.
13. Touchette L., Godbout J., Lamothe M., Porth I. M., Isabel N. A cryptic syngameon within *Betula* shrubs revealed: Implications for conservation in changing subarctic environments. *Evolutionary Applications*, 2024. 17. <http://doi/10.1111/eva.13689>.
14. Таксационный справочник по лесным ресурсам России (за исключением древесины) / Л. Е. Курлович, В. Н. Косицын. Пушкино : ВНИИЛМ, 2018. 282 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38169205>.
15. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Часовских В. П. Всеобщие аллометрические модели фитомассы берёз (род *Betula* L.): мета-анализ // *Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства*. 2023; 4: 4–15. <http://doi:10.21178/2079-6080.2023.4.4>
16. Медведева С. О., Черепанова О. Е., Филиппов Е. Г., Копориков А. Р. Использование ITS маркеров для определения видовой принадлежности берез секции *Arterocaryon* / *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*, 2023. Т. 22, № 2. С. 187–190. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55079904>.
17. Zhan Y., Su T., Han M., Sun D. A multiplex polymerase chain reaction method for rapid detection of foreign genes in transgenic birch (*Betula platyphylla*). *Sun Bulletin of botanical research*, 26 (4) 2006, p. 480–485. <http://doi:10.7525/j.issn.1673-5102.2006.04.003>
18. Zeng F. S., Zhan Y. G., Zhao H. C. *et al.* Molecular characterization of T-DNA integration sites in transgenic birch. *Trees* 24, 2010, p. 753–762. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0445-6>.
19. Li Y., Yuan Y., Hu Z., Liu S., Zhang X. Genetic Transformation of Forest Trees and Its Research Advances in Stress Tolerance. *Forests* 2024, 15, 441. <https://doi.org/10.3390/f15030441>.
20. Chu X., Wang M., Fan Z., Li J., Yin H. Molecular Mechanisms of Seasonal Gene Expression in Trees. *Int. J. Mol. Sci.* 2024, 25, 1666. <https://doi.org/10.3390/ijms25031666>.
21. Исаков И. Ю., Сиволапов А. И. Лесная генетика и селекция : учебное пособие / под ред. А. И. Сиволапова. Воронеж, 2020. 225 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43973151>.
22. Медведева С. О., Черепанова О. Е. Таксономические вопросы рода *Betula* // *Сибирский лесной журнал*. 2023. № 2. С. 65–75. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=lmswtw&ysclid=lwjmsavji2191651463>.



23. Ivetić V. et al. The role of forest reproductive material quality in forest restoration // *Forestry Engineering Journal*. 2019; 9 (2): 56-65. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
24. Zhou L., Dai L., Wang S. *et al.* Changes in carbon density for three old-growth forests on Changbai Mountain, Northeast China: 1981–2010. *Annals of Forest Science* 2011; 68, 953–958. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0101-3>.
25. Попов В. К. Березовые леса Центральной лесостепи России. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. лесотехн. академии, 2003. 424 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19505353>.
26. Araya H., Otaka J., Nishihara E., Fujii Y. First isolation and identification of salicylate from *Betula grossa* var. *ulmifolia* - a potent root growth inhibitor. *Allelopathy J.* 2012; 30: 153–158.
27. Wang N., McAllister H. A., Bartlett P. R., Buggs R. J. A. Molecular phylogeny and genome size evolution of the genus *Betula* (Betulaceae). 2016; *Annals of Botany*, 117(6), 1023–1035. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCW048>.
28. Dahle G. A., Gallagher F. J., Gershenson D., Schäfer K. V. R., Grabosky J. C. Allometric and mass relationships of *Betula populifolia* in a naturally assembled urban brownfield: implications for carbon modeling. *Urban Ecosyst.* 2014; 17: 1147–1160. <http://doi10.1007/s11252-014-0377-9>.
29. Усенко Н. В. Деревья, кустарники и лианы Дальнего Востока : справочная книга / под общ. ред. С. Д. Шлотгауэр. 3-е изд., перераб. и доп. Хабаровск : Приамурские ведомости, 2009. 271 с.
30. Сафронычева Е. Д., Лыткин К. Ф., Каржаев Д. С., Волков В. А. Создание ДНК-библиотек для высокопроизводительного генотипирования березы карельской и анализ их качества. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2023; (246): 206-220. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.206-220>.
31. Ведерников Д. Н., Рысева Е. А. Синтез сложных эфиров сесквитерпеновых спиртов почек берёзы и кумаровой кислоты. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2022; 238: 160-169. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.160-169>.
32. Исаков, И. Ю. Влияние способа опыления на селекционные особенности семенного потомства *Betula pendula* Roth. и *B. pubescens* Ehrh : дис. ... канд. с.-х. наук : 06.03.01 / Исаков Игорь Юрьевич. – Воронеж, 2001. – 218 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19166593>.

### References

1. Grattapaglia D., Silva-Junior O. B., Resende R. T., Cappa E. P., Müller B. S. F., Tan B., Isik F., Ratcliffe B., El-Kassaby Y. A. Quantitative Genetics and Genomics Converge to Accelerate Forest Tree Breeding. *Front. Plant Sci.* 2018; 9:1693. <http://doi.org/10.3389/fpls.2018.01693>.
2. Possen B. J. H. M., Rousi M., Keski-Saari S., Silfver T., Kontunen-Soppela S., Oksanen E., Mikola J. New evidence for the importance of soil nitrogen on the survival and adaptation of silver birch to climate warming 2021. *Ecosphere*, 12(5). <http://doi:10.1002/ecs2.3520>.
3. Sapelnikova I. I. Ozenka mnogoletnih fenologicheskikh dannyh nekotoryh drevesno-kustarnikovykh vidov v Voronezhskom zapovednike / Trudy Voronezhskogo gosudarstvennogo zapovednika. Vyp. XXXI ; FGBU «Voronezhskiy gosudarstvenny zapovednik». Voronezh: Zifrovaya poligrafiya, 2023; p. 174-228 (in Russian). [http://doi:10.57007/9785907669321\\_2023\\_31\\_174](http://doi:10.57007/9785907669321_2023_31_174).
4. Belton S., Cubry P., Fox E., Kelleher C. T. Novel Post-Glacial Haplotype Evolution in Birch – A Case for Conserving Local Adaptation. *Forests*. 2021;12, 1246. <https://doi.org/10.3390/f120912>.
5. Anamthawat-Jónsson K. Hybrid introgression: the outcomes of gene flow in birch. *Science Asia*. 2019; 45: 203–211. <http://doi:10.2306/scienceasia1513-1874>.
6. Isakov I. Yu., Tabatskaya T. M., Vnukova N. I., Mashkina O. S., Mikhin V. I., Govedar Z. (2023). Phenotypical and genetic breeding evaluation silver birch and downy birch ex situ and in vitro. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, № 50-2, pp. 25-42 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/2>.

7. Sharma U., Sankhyan H. P., Kumari A. *et al.* Genomic selection: a revolutionary approach for forest tree improvement in the wake of climate change. *Euphytica* 220, 9 2024. <https://doi.org/10.1007/s10681-023-03263-5>.
8. Anamthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Thórsson Æ.T., Jóhannsson M. H. Naturally occurring triploid birch hybrids from woodlands in Iceland are partially fertile. *New Forests*. 2021; 52: 659–678. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09816-z>.
9. Holmström E., Karlsson M., Nilsson U. (2017) Modeling birch seed supply and seedling establishment during forest regeneration. *Ecol Model* 352: 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.027>.
10. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Introdukciya karelskoy berezy: istoriya, opyt i ozenka perspektiv. *Hortus Botanicus : mezhdunarodny elektronny zurnal botanicheskikh sadov*. 2023; T. 18. C. 310–331 (in Russian). URL: <http://elibrary.petsru.ru/books/68267>.
11. Milennaya L. A., Isakov I. Yu. Ispytaniye potomstv chetyreh vidov berez v Orlovskoy oblasti / Opytnaya baza v lesnoy selekzii: sb. nauch. tr. Voronezh : NIILGiS, «Kvadrat», 1995, p. 89-93 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25370733>.
12. Wang N., Mcallister H. A., Bartlett P. R., Buggs R. J. Molecular phylogeny and genome size evolution of the genus *Betula* (Betulaceae). 2016 *Ann. Bot.* 117, 1023–1035. <http://doi:10.1093/aob/mcw048>.
13. Touchette L., Godbout J., Lamothe M., Porth I. M., Isabel N. A cryptic syngameon within *Betula* shrubs revealed: Implications for conservation in changing subarctic environments. *Evolutionary Applications*, 2024. 17. <http://doi/10.1111/eva.13689>.
14. Kurlovich L. E., Kositsyn V. N. Taksatsionny spravochnik po lesnym resursam Rossii (za isklucheniem drevesiny). – Pushkino : VNIILM, 2018. – 282 s. (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38169205>.
15. Usoltsev V. A., Tsepordey I. S., Chasovskih V. P. Vseobshnie allometricheskie modeli fitomassy berez (rod *Betula* L.): meta-analiz / *Trudy Sankt-Peterburgskogo NII lesnogo hozaystva*. 2023 (4). p. 4-15 (in Russian). <http://doi:10.21178/2079-6080.2023.4.4>.
16. Medvedeva S. O., Cherepanova O. E., Filippov E. G., Koporikov A. R. Ispolzovaniye ITS markerov dlya opredeleniya vidovoy prinadlezhnosti berez sekkii Apterocaryon / *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii*, 2023. T. 22, № 2, p. 187-190 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55079904>.
17. Zhan Y., Su T., Han M., Sun D. A multiplex polymerase chain reaction method for rapid detection of foreign genes in transgenic birch (*Betula platyphylla*). *Sun Bulletin of botanical research*, 26(4) 2006, p. 480-485. <http://doi:10.7525/j.issn.1673-5102.2006.04.003>.
18. Zeng F. S., Zhan Y. G., Zhao H. C. *et al.* Molecular characterization of T-DNA integration sites in transgenic birch. *Trees* 24, 2010, p. 753–762. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0445-6>.
19. Li Y., Yuan Y., Hu Z., Liu S., Zhang X. Genetic Transformation of Forest Trees and Its Research Advances in Stress Tolerance. *Forests* 2024, 15, 441. <https://doi.org/10.3390/f15030441>.
20. Chu X., Wang M., Fan Z., Li J., Yin H. Molecular Mechanisms of Seasonal Gene Expression in Trees. *Int. J. Mol. Sci.* 2024, 25, 1666. <https://doi.org/10.3390/ijms25031666>.
21. Isakov I. Yu., Sivolapov A. I. Lesnaya genetika i selektsiya: uchebnoye posobiye [Forest Genetics and Breeding] / ed. by A. I. Sivolapov. Voronezh, 2020. 225 p. (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43973151>.
22. Medvedeva S. O., Cherepanova O. E. Taksonomicheskiye voprosy roda *Betula* / *Sibirsky lesnoy zhurnal*. 2023. № 2. p. 65–75 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=lmswtw&ysclid=lwjmsavji2191651463>.
23. Ivetić V. *et al.* The role of forest reproductive material quality in forest restoration. *Forestry Engineering Journal*. 2019; 2 (9): 56-65. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
24. Zhou L., Dai L., Wang S. *et al.* Changes in carbon density for three old-growth forests on Changbai Mountain, Northeast China: 1981–2010. *Annals of Forest Science* 2011; 68, 953–958. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0101-3>.
25. Popov V. K. Berezovye lesa Tsentralnoy lesostepi Rossii [Birch forests of the Central Forest-Steppe of Russia]. Voronezh, 2003; 424 p. (in Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19505353>.

26. Araya H., Otaka J., Nishihara E., Fujii Y. First isolation and identification of salicylate from *Betula grossa* var. *ulmifolia* - a potent root growth inhibitor. *Allelopathy J.* 2012; 30: 153–158.
27. Wang N., McAllister H. A., Bartlett P. R., Buggs R. J. A. Molecular phylogeny and genome size evolution of the genus *Betula* (Betulaceae). 2016; *Annals of Botany*, 117(6), 1023–1035. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCW048>.
28. Dahle G. A., Gallagher F. J., Gershenson D., Schäfer K. V. R., Grabosky J. C. Allometric and mass relationships of *Betula populifolia* in a naturally assembled urban brownfield: implications for carbon modeling. *Urban Ecosyst.* 2014; 17: 1147–1160. <http://doi10.1007/s11252-014-0377-9>.
29. Usenko N. V. *Derev'a, kustarniki i liany Dalnego Vostoka : spravochnaya kniga* / ed. by S. D. Shlotgauer. 3rd ed. Khabarovsk : Priamurskiye vedomosti, 2009. 271 s. (in Russian).
30. Safronycheva E. D., Lytkin K. F., Karzhaev D. S., Volkov V. A. Creation of DNA libraries for high-throughput genotyping of Karelian birch and analysis of their quality. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii.* 2023; (246): 206–220. (In Russian). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.206-220>.
31. Vedernikov D. N., Ryseva E. A. Synthesis of esters of birch bud sesquiterpene alcohols and cinnamic acid derivatives. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii.* 2022; (238): 160–169. (In Russian). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.160-169>.
32. Isakov I. Yu. *Vliyaniye sposoba opyleniya na selekzionnye osobennosti semennogo potomstva Betula pendula Roth. i B. pubescens Ehrh : dis. ... kandi. s.-h. nauk : 06.03.01* / Isakov Igor Yuryevich. Voronezh, 2001. 218 s. (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19166593>.

### Сведения об авторе

*Исаков Игорь Юрьевич* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесных культур, селекции и лесомелиорации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; e-mail: [labgen@vglta.vrn.ru](mailto:labgen@vglta.vrn.ru).

### Information about the author

*Igor Yu. Isakov* – Cand.Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Forest Crops, Breeding and Land Reclamation, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: [labgen@vglta.vrn.ru](mailto:labgen@vglta.vrn.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/2>


УДК 630.114.30



## Сохранность и особенности роста лесных культур на мело-мергельных техногенных почвах Курской области

Татьяна П. Деденко ✉, [dedenkotp@mail.ru](mailto:dedenkotp@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-5914-1225>

Елена Н. Тихонова, [tichonova-9@mail.ru](mailto:tichonova-9@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>

Татьяна А. Малинина, [malinina15@yandex.ru](mailto:malinina15@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-5967-3336>

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

В Курской области на мело-мергельных отвалах Щигровского фосфоритного рудника апробирован один из агротехнических приемов по проведению горнотехнического этапа подготовки поверхности отвала для лесной рекультивации, который заключается в выравнивании его поверхности и нанесении потенциально более плодородного мелиоративного слоя с последующей механизированной обработкой. Целенаправленно сформированы три варианта искусственных грунтосмесей на основе песка, суглинка, гумуса и созданы культуры *Betula pendula* Roth и *Robinia pseudoacacia* L. Для каждого варианта слоя грунтосмеси в сравнении с контрольным вариантом (мело-мергельный грунт без нанесения мелиоративного слоя) изучали динамику показателей сохранности, среднего прироста, бонитета, запаса, напряжения роста  $H/G_{1,3}$  ratio в диапазоне 5-30 лет. Сохранность культур робинии псевдоакация (*R. pseudoacacia*) в возрасте 30 лет в контрольном варианте составляет 36 % ( $p < 0,05$ ), с нанесением почвоулучшающего слоя сохранность достигает 70 % ( $p < 0,05$ ). Сохранность березы повислой (*B. pendula*) на мело-мергеле без улучшения лесорастительных условий составляет 24 % ( $p < 0,05$ ), с нанесением мелиоративного слоя практически во всех трех вариантах – 43-45 %. *B. pendula* и *R. pseudoacacia* в насаждении, созданном на мело-мергеле (контрольный вариант) показали в насаждении наименьшие показатели высоты дерева и диаметра на высоте 1,3 м, что соответствует III...IV классам бонитета. Насаждения *R. pseudoacacia* в контрольном варианте в возрасте 10 лет имеют максимальное значение показателя напряжения роста  $H/G_{1,3}$  ratio – 52,3 см/см<sup>2</sup> и в возрасте 30 лет показатель составляет 8,4 см/см<sup>2</sup>. Коэффициент напряжения роста *B. pendula* в контрольном варианте в возрасте 15 лет достигает 130 см/см<sup>2</sup> и к 30-летнему возрасту насаждения снижается до 21,0 см/см<sup>2</sup>. В возрасте 30 лет происходит снижение показателя в вариантах: с песчаным слоем в 4,4 раза, с слоем суглинка – в 3,1, с гумусовым слоем – в 2,4 раза.

**Ключевые слова:** рекультивация техногенных ландшафтов, мело-мергель, мелиоративный слой, береза повислая, *Betula pendula* Roth, робиния псевдоакация, *Robinia pseudoacacia* L., сохранность лесных культур, показатель напряжения  $H/G_{1,3}$  ratio

**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:** Деденко, Т. П. Сохранность и особенности роста лесных культур на мело-мергельных техногенных почвах Курской области / Т. П. Деденко, Е. Н. Тихонова, Т. А. Малинина // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 20–35. – Библиогр.: с. 32–34 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/2>.

Поступила 04.05.2024. Пересмотрена 24.05.2024. Принята 25.05.2024. Опубликована онлайн 17.06.2024

Article

## Preservation and features of growth of forest crops on chalk-marl technogenic soils of the Kursk region

Tatiana P. Dedenko ✉, dedenkotp@mail.ru, [ID 0000-0002-5914-1225](https://orcid.org/0000-0002-5914-1225)

Elena N. Tikhonova, tichonova-9@mail.ru [ID https://orcid.org/0000-0002-9039-9822](https://orcid.org/0000-0002-9039-9822)

Tatiana A. Malinina, malinina15@yandex.ru [ID https://orcid.org/0000-0002-5967-3336](https://orcid.org/0000-0002-5967-3336)

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

### Abstract

In the Kursk region, one of the agrotechnical techniques for conducting the mining stage of preparing the surface of the dump for forest reclamation, which consists in leveling its surface and applying a potentially more fertile reclamation layer with subsequent mechanized processing, has been tested on the chalk-marl dumps of the Shchigrovsky phosphorus mine. Three variants of artificial soil mixtures based on sand, loam, and humus were purposefully formed and cultures of *Betula pendula* Roth and *Robinia pseudoacacia* L. were created. For each variant of the soil mixture layer, in comparison with the control variant (fine marl soil without applying a reclamation layer), the dynamics of safety indicators, average gain, bonus, reserve, H/G<sub>1.3</sub> ratio in the range of 5-30 years were studied. The safety of crops of *R. pseudoacacia* at the age of 30 years in the control variant is 36% ( $p < 0.05$ ), with the application of a soil-improving layer, the safety reaches 70% ( $p < 0.05$ ). The safety of the hanging birch (*B. pendula*) on chalk marl without improving forest growing conditions is 24% ( $p < 0.05$ ), with the application of a reclamation layer in almost all three variants – 43-45%. *B. pendula* and *R. pseudoacacia* in a plantation created on chalk marl (control variant) showed the lowest tree height and diameter in the plantation at height 1.3 m, which corresponds to the IV site classes of the bonus. *R. pseudoacacia* plantings in the control variant at the age of 10 years have a maximum value of the growth stress index H/G<sub>1.3</sub> ratio of 52.3 cm/cm<sup>2</sup> and at the age of 30 years the indicator is 8.4 cm/cm<sup>2</sup>. The H/G<sub>1.3</sub> ratio of *B. pendula* in the control variant reaches 130 cm/cm<sup>2</sup> at the age of 15 years and decreases to 21.0 cm/cm<sup>2</sup> by the age of 30 years of planting. At the age of 30, the indicator decreases in the variants: with a sandy layer by 4.4 times, with a loam layer – by 3.1, with a humus layer – by 2.4 times.

**Keywords:** reclamation of man-made landscapes, chalk marl, forest reclamation layer, hanging birch, *Betula pendula* Roth, *Robinia pseudoacacia*, *Robinia pseudoacacia* L., forest crop safety, growth intensity coefficient H/G<sub>1.3</sub> ratio

**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:** Dedenko T. P., Tikhonova E. N., Malinina T. A. (2024). Preservation and features of growth of forest crops on chalk-marl technogenic soils of the Kursk region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 20-35 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/2>.

*Received* 04.05.2024. *Revised* 24.05.2024. *Accepted* 25.05.2024. *Published online* 17.06.2024.

### Введение

Нарушенные горнодобывающей деятельностью земли в Курской области составляют более

35 тыс. га. С образованием, начиная с 1950-х годов XX века, техногенных ландшафтов на отвалах вскрышных пород в процессе разработки карьеров

Курской магнитной аномалии (КМА) возникла необходимость восстановления лесных экосистем на обширных площадях нерекультивированных земель. Вопросам теоретических и практических исследований восстановления антропогенных ландшафтов посвящены работы таких географов и почвоведов, как Владимир Алексеевич Андроханов (2023) [1], Федор Николаевич Мильков (2018) [6], Владимир Борисович Михно (2020) [7] и другие ученые.

Е.А. Кушнир и др. (2021) [4], В.И. Уфимцев (2017) [10], R. Pazur и др. (2020) [11], S. Macdonald и др. (2015) [19] отмечают снижение качества почв вследствие дегумификации, ухудшения агрофизических свойств, разрушения почвенной структуры и загрязнения в результате усиленной техногенной нагрузки функционирующих крупных горнодобывающих предприятий. Т.П. Деденко (2019) [3] определено, что в структуре надрудной вскрыши, в местах открытой добычи руды КМА, наряду с песчаными отложениями и суглинками, до 70 % представлено мело-мергельными и меловыми горными породами.

В результате складирования громадного количества мело-мергельных вскрышных пород образуются генетически неоднородные ландшафтные комплексы (АМЛК), характеризующиеся своеобразными условиями микроклимата. Основа АМЛК – мело-мергельные породы – являются, по мнению Е.А. Гурковой и др. (2020) [2], Т.А. Малининой и др. (2022) [5], малопригодными для биологического освоения. В сухом состоянии они пылят, подвергаются процессам ветровой и водной эрозии и служат причиной изменения и загрязнения окружающей среды. Наряду с этим на формирование АМЛК оказывают влияние зональные климатические условия и ландшафтно-типологические особенности территории. Е.А. Кушнир и др. (2021) [4], Ф.Н. Мильков (2018) [6] не исключают возможности того, что физико-химические свойства мелового субстрата способствуют созданию неблагоприятных условий для роста растений. R. Pazur и др. (2020) [11], S. Bruno и др. (2019) [12], К. McMahen в своих исследованиях указывают, что растения чувствительны к текстурным особенностям, гранулометрическому и агрохимическому составу меловых горных пород.

В достижении высоких показателей успешного облесения АМЛК, как показали собственные исследования [3], работы В.А. Андроханова и др. (2023) [1], Э.И. Трещевской и др. (2019) [23], В. Doddabasawa и др. (2018) [14], E. Nurtjahya и др. (2019) [21], P.Z.F. Santos и др. (2019) [22], ведущую роль играет объективная оценка агрофизических и агрохимических свойств материнской горной породы и субстратов для её мелиорации, а также подбор лесных культур (деревьев, кустарников), устойчиво произрастающих на данном субстрате, наблюдения за особенностями процесса онтогенеза на техногенных почвах.

Для решения проблемы сокращения негативного влияния карьерно-отвалных ландшафтов на окружающую среду рекомендуют различные агротехнические приемы [3,5,13]. Один из них заключается в особом проведении горнотехнического этапа подготовки поверхности отвала, а именно выравнивании его поверхности и нанесение потенциально более плодородного мелиоративного слоя с последующей механизированной обработкой. Таким образом, целенаправленно формируют искусственные грунты, представленные аккумулятивными слабо развитыми почвами на рыхлых техногенных грунтах [3]. Изучением вопросов формирования, классификации и свойств техноземов и эмбриоземов посвящены работы Андроханова В.А., Етеревской Л.В., Гаджиева И.М., Курачева В.М., Герасимовой М.И. и др. Однако, до настоящего времени в России и в мире, вопросы по предотвращению неблагоприятного воздействия складированных вскрышных горных пород в отвалы остаются сравнительно малоизученными.

Цель исследований – оценка сохранности и особенностей роста культур на мело-мергельных техногенных почвах Курской области с определением биометрических показателей (включая коэффициент напряженности роста  $H/G_{1.3}$  ratio) класса бонитета, запаса и возрастной динамики за 30-летний период наблюдений.

## Материалы и методы

### Объект и предмет исследования

Объект исследования – отвалы бывшего Щигровского фосфоритного рудника в Курской области РФ. Географические координаты – 51.86771 с.ш. 37.11345 в.д.

Предмет исследований – экспериментальные лесные культуры *Betula pendula* Roth и *Robinia pseudoacacia* L., заложенные на АМЛК в 1974 году механизированной посадкой по схеме 2,5 × 0,7 м в мелиоративные субстраты трех вариантов с высотой слоя 40...50 см на базе эмбриоземов мело-мергеля и в чистый слой мело-мергеля (контроль). Первый вариант мелиоративного субстрата: песчаные отложения, второй – четвертичные суглинки, третий – почва с определенным содержанием гумуса.

### Сбор данных

Объем исследований обусловлен намеченными целью и задачами работы. Закладывали 8 пробных площадей и выполняли анализ 18 модельных деревьев каждого вида с использованием методики А.Д. Дударева<sup>1</sup> и др. (1978). Экспериментальные лесные культуры (N = 18) робинии псевдоакация и березы повислой (*B. pendula*) исследовали на предмет дифференциации роста при различных вариантах формирования мелиоративного слоя с помощью комплексного показателя (H/G<sub>1.3</sub> ratio), рассчитанного в см/см<sup>2</sup> [3], а также определяли сохранность, высоту, диаметр на уровне 1,3 м и класс бонитета насаждения. Сохранность деревьев определяли через соотношение числа высаженных саженцев к числу сохранившихся на пробной площади деревьев на момент наблюдения. Определение запасов насаждений, прирост по годам проводили способом средней расчетной модели (из общего числа деревьев отбирали среднюю расчетную модель в количестве 2 шт.).

### Анализ данных

ANOVA-анализ экспериментальных данных производили методами вариационной статистики с помощью пакета прикладных программ для моделирования роста Microsoft Excel 2016 и Statsoft

Statistica, версия 10, с установлением «средних величин, ошибок точности и достоверности опыта» [3].

## Результаты

Сохранность культур робинии псевдоакация (*R. pseudoacacia*) в возрасте 5-30 лет представлена на рисунке 1. Интенсивное снижение сохранности культур робинии псевдоакация (*R. pseudoacacia*) в контрольном варианте выявлено в возрасте 25 лет и составляет 52 %. В 30-летнем возрасте сохранность культур продолжает снижаться, и достигает 36 %. В вариантах с применением мелиоративных слоев сохранность робинии псевдоакация находится в пределах 60...70 %.

Показатель сохранности 30-летних культур *B. pendula* в контрольном варианте (мело-мергель) составляет 24 % и увеличивается до 43...45 % при использовании мелиоративного слоя всех трех вариантов .

Характеристика культур в возрасте 30 лет на техногенных почвах представлена в табл. 1.

В контрольном варианте насаждения березы повислой (*B. pendula*) и робинии псевдоакация (*R. pseudoacacia*) классифицировали 3-4 классом бонитета, модельные деревья имеют наименьшие значения диаметра (на уровне 1,3 м) 12,0±0,43 и 7,3±0,37 см при высотах 8,8 и 9,5 м соответственно. Средний прирост для *B. pendula* по запасу составляет 0,6 м<sup>3</sup>/га, для *R. pseudoacacia* – 1,6 м<sup>3</sup>/га.

При использовании первого варианта мелиоративного субстрата энергия роста культур березы (*B. pendula*) возрастает, высота культур увеличивается относительно контрольного варианта в 1,6 раза, при использовании второго и третьего вариантов – в 1,8 раза и составляет 14,1; 15,8 и 16,2 м соответственно (I-II класс бонитета). При этом в первом варианте средний прирост по запасу увеличивается до 4,9 м<sup>3</sup>/га, т.е. в 8,4 раза. В вариантах с нанесением на мело-мергельный грунт четвертичного суглинка и гумусированного слоя приводит к увеличению среднего прироста до 6,4 м<sup>3</sup>/га и 6,6 м<sup>3</sup>/га, т.е. в 11,0...11,3 раза.

<sup>1</sup> Дударев, А. Д. Методика и техника работ на пробных площадях / А. Д. Дударев, Н. В. Гладышев, А. Д. Лозовой. Воронеж, 1978. 80 с.



Рисунок 1. Сохранность культур робинии псевдоакации (*R. pseudoacacia*) в возрасте 5-30 лет на техногенной почве в Курской области

Figure 1. *Robinia pseudoacacia* L. safety aged from 5 years to 30 growing technogenic soil on Kursk region

Источник: собственная композиция автора.

Source: author's composition

Сохранность культур *B. pendula* Roth представлена на диаграмме (рис. 2).



Рисунок 2. Сохранность культур березы повислой (*B. pendula*) в возрасте 5-30 лет на техногенной почве в Курской области

Figure 2. *Betula pendula* Roth safety aged from 5 years to 30 growing technogenic soil on Kursk region

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition



Характеристика 30-летних культур на техногенных почвах

Table 1

Characteristics of crops aged 30 on the technogenic soil.

Вид   Type	Средний показатель   Average rate			Бонитет   Bonitet	Запас, м <sup>3</sup> /га   Space, m <sup>3</sup> /ha
	Н <sub>ср</sub> , м   Average height, m	Д <sub>ср</sub> , см   Average diameter, cm	Прирост средний, м <sup>3</sup> /га   Average increase, m <sup>3</sup> /ha		
Контрольный вариант мелиоративного субстрата   Chalk and marl soil (examine)					
<i>Robinia pseudoacacia</i>	9,5	12,0±0,43	1,6	III	49,4
<i>Betula pendula</i>	88,8	7,3±0,37	0,6	IV	17
Первый вариант мелиоративного субстрата   Chalk and marl soil and sand and chalk layer 40 – 50 cm					
<i>Robinia pseudoacacia</i>	112,0	14,7±0,38	7,8	II	236
<i>Betula pendula</i>	114,4	12,9±0,25	4,9	I	148
Второй вариант мелиоративного субстрата   Chalk and marl soil and quaternary clay loam chalk layer 40 – 50 cm					
<i>Robinia pseudoacacia</i>	110,9	12,8±0,31	4,6	II	135
<i>Betula pendula</i>	115,9	14,9±0,25	6,4	I	193
Третий вариант мелиоративного субстрата   Chalk and marl soil and humus soil chalk layer 40 – 50 cm					
<i>Robinia pseudoacacia</i>	111,2	17,0±0,34	7,7	I	232
<i>Betula pendula</i>	116,2	18,4±0,39	6,6	I	198

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Сохранность, биометрические показатели и возрастная динамика (5-30 лет) напряженности роста березы повислой (*B. pendula*) и робинии псевдоакация (*R. pseudoacacia*) в лесных культурах АМЛК объекта исследований представлена в табл. 2.

Из таблицы видно, что наибольшие показатели напряженности роста характерны для насаждений, произрастающих на мело-мергеле без мелиоративного слоя (контроль). Насаждения робинии псевдоакация (*R. pseudoacacia*), произрастающие на мело-мергеле без улучшения в возрасте 10 лет имеют максимальное значение напряженности роста – 52,3 см/см<sup>2</sup> и в возрасте 30 лет показатель уменьшается в 6,2 раза, что составляет 8,4 см/см<sup>2</sup>. В вариантах с нанесением на мело-мергельный грунт мелиоративных слоев показатель напряженности роста в 10 летнем возрасте культур снижается незначительно, в среднем в 1,1 раза. Это является следствием биологических свойств вида как мало требовательного к почвенному плодородию. В воз-

расте 30 лет происходит снижение показателя в вариантах: с песчаным слоем – в 7,2 раза, с слоем суглинка 7,05 раза и с гумусовым слоем в 9,3 раза

### Обсуждение

Существенным критерием успешности облесения техногенных почв является показатель приживаемости семян в первый год их жизни. Приживаемость во многом зависит от температурного режима вегетационного периода, количества атмосферных осадков и равномерности их выпадения по месяцам. Робиния псевдоакация (*R. pseudoacacia*) является одним из наиболее перспективных видов для лесной рекультивации вследствие засухоустойчивости и нетребовательности к почвенному плодородию.

По результатам исследования Андрущенко П.Ф. (1979), приживаемость семян робинии псевдоакация на мело-мергельном грунте в контрольном варианте без нанесения мелиоративного слоя в первый год вегетации была достаточно высокой и составляла 90 %.

Сохранность, биометрические показатели и возрастная динамика напряженности роста березы повислой (*B. pendula*) и робинии псевдоакация (*R. pseudoacacia*) в лесных культурах АМЛК объекта исследований

Table 2

Preservation, biometric indicators and age dynamics of tension of *Betula pendula* and *Robinia pseudoacacia* crops growth on the technogenic soil in the Kursk region

№ п/п	Техногенная почва   Technogenic soil	Сохранность, %   Preservation of trees, %	Средняя высота деревьев (H <sub>ср</sub> ), м   Average height of trees (Average height), m	Средний диаметр деревьев на 1,3 м (D <sub>ср</sub> ), см   Average diameter of trees by 1,3 m (Average diameter), cm	Комплексный показатель роста деревьев по   Intensity of tree growth in the stand by	
					H <sub>ср</sub> : D <sub>ср</sub> м см <sup>-1</sup>   Average height.: Average diameter m cm <sup>-1</sup>	H <sub>ср</sub> : G <sub>ср</sub> см см <sup>2</sup>   Average height.: Average G cm cm <sup>2</sup>
<b>1. Возраст культур – 5 лет   Plantation age – 5 years</b>						
<i>Betula pendula</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эмбриозем)   No treatment of chalk and marl	50,2	0,4	-	-	-
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	60,4	1,6	2,5	0,64	61,2
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	68,5	1,0	-	-	-
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	74,3	3,4	3,1	1,096	45,1
<i>Robinia pseudoacacia</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эмбриозем)   No treatment of chalk and marl	90,0	0,3	-	-	-
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	85,0	1,3	0,9	-	-
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	90,0	0,9	-	-	-
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	90,0	0,5	-	-	-
<b>2. Возраст культур – 10 лет   Plantation age – 10 years</b>						
<i>Betula pendula</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эмбриозем)   No treatment of chalk and marl	45,0	0,9	-	-	-
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	58,0	5,0	4,2	1,238	51,0
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	65,0	4,0	3,8	1,052	36,8
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	68,6	6,3	6,0	1,05	24,4

## Природопользование

<i>Robinia pseudoacacia</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эм-бриозем)   No treatment chalk and marl	86,4	0,5	-	-	52,3
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	84,4	4,06	3,3	1,230	51,1
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	86,7	2,7	3,6	0,75	47,3
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	88,0	1,5	2,1	0,714	48,6
3. Возраст культур – 15 лет   Plantation age – 15 years						
<i>Betula pendula</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эм-бриозем)   No treatment chalk and marl	38,0	1,5	1,2	1,25	130,4
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	55,5	7,1	6,7	1,059	49,0
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	62,0	8,0	6,8	1,176	28,0
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	64,0	9,4	9,8	0,959	14,4
<i>Robinia pseudoacacia</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эм-бриозем)   Chalk and marl	81,3	1,3	2,0	0,65	41,9
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	84,0	7,5	5,1	1,470	43,5
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	84,5	5,6	4,8	1,166	38,6
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	86,7	4,1	4,3	0,953	32,8
4. Возраст культур- 20 лет   Plantation age – 20 years						
<i>Betula pendula</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эм-бриозем)   No treatment of chalk and marl	33,5	5,0	5,3	0,943	22,6
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	54,4	8,9	8,8	1,011	3,7
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	53,5	11,2	9,5	1,179	5,9
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	58,5	11,7	13,9	0,841	8,3
<i>Robinia pseudoacacia</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эм-бриозем)   No treatment of chalk and marl	78,3	3,9	4,8	0,812	1,5
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	83,6	9,3	8,0	1,162	8,7
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	82,4	7,6	6,8	1,118	6,3
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	85,3	6,7	7,3	0,918	6,3
5. Возраст культур - 25 лет   Plantation age – 25 years						
<i>Betula pendula</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эм-бриозем)   No treatment of chalk and marl	30,0	6,8	6,3	1,079	1,8
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	48,0	11,9	11,5	1,035	2,4
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	50,0	13,6	12,3	1,105	2,1

	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	52,0	13,9	14,8	0,939	7,9
<i>Robinia pseudoacacia</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эм-бриозем)   No treatment of chalk and marl	52,0	6,0	7,0	0,857	5,6
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	76,3	10,5	9,7	1,082	4,1
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	78,7	9,3	8,2	1,134	1,5
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	69,2	8,5	9,5	0,894	2,0
<b>6. Возраст культур 30 лет   Plantation age – 30 years</b>						
<i>Betula pendula</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эм-бриозем)   No treatment of chalk and marl	24,0	8,8	7,3	1,205	1,0
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	43,0	14,4	12,9	1,116	1,2
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	43,0	15,9	14,9	1,067	9,1
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	45,0	16,2	18,4	0,880	5,9
<i>Robinia pseudoacacia</i>						
	Контрольный вариант: мело-мергель (эм-бриозем)   No treatment of chalk and marl	36,0	9,5	12,0	0,791	8,4
	Мело-мергель с песчаными отложениями   Chalk and marl with sand deposit	70,0	12,0	14,7	0,816	7,1
	Мело-мергель с четвертичным суглинком   Chalk and marl with quaternary clay loam	60,0	10,9	12,8	0,851	6,7
	Мело-мергель с гумусовым слоем почвы   Chalk and marl with humus layer	66,0	11,2	17,0	0,658	5,2

Источник: собственные вычисления автора.

Source: own calculation

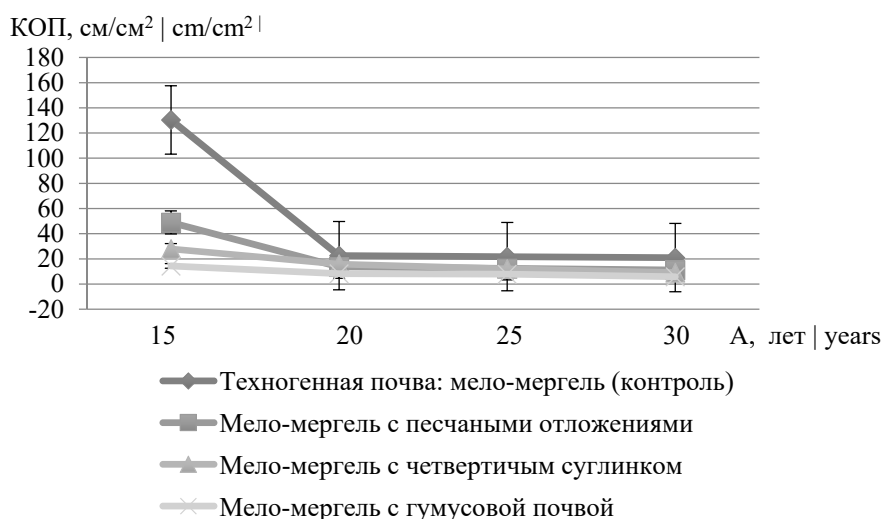


Рисунок 3. Возрастная динамика комплексного показателя роста культур березы повислой (*B. pendula*) на техногенной почве Курской области

Figure 3. Coefficient age dynamics of tension of growth of *Betula pendula* on the technogenic soil in the Kursk region

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

В культурах березы повислой (*B. pendula*) сохранность - 50,2 %. По результатам исследований Трещевской Э.И. (2012), сохранность робинии псевдоакалии (*R. pseudoacacia*) в аналогичных почвенно-грунтовых условиях при благоприятном водном и тепловом режиме может достигать 91,8...100 %.

Формирование техногенных почв путем нанесения на мело-мергельный грунт потенциально более плодородного мелиоративного слоя существенного влияния не оказали на повышение приживаемости семян робинии псевдоакалии (*R. pseudoacacia*). Однако, увеличение сохранности культур березы повислой (*B. pendula*) прослеживается в этих вариантах на 10...15 %. Это связано с улучшением водно-физических, а также агрохимических свойств техноземов, а именно, показатель реакции почвенной среды (рН) пахотного горизонта уменьшился с 8,5 до 7,4, сумма обменных катионов  $Ca^{++}$  и  $Mg^{++}$  возросла с 3,2 до 11,2 мг на 100 г грунта. Добровольский Г.В., Е.Д. Никитин (1990) отмечали, что мелиоративный слой, в отличие от зональных почв, генетически не связаны друг с другом, но обладают определенными «почвенными» экологическими функциями, такими как продукционными, сорбционными и водно-миграционными. Таким образом, на начальном этапе роста культур оптимизируются лесорастительные условия, приближаясь к экологическим и биологическим требованиям древесных видов.

Как указывал Шульга В.Д. (2000), связь между качеством лесорастительных условий и ростом культур отражается комплексным показателем - коэффициентом напряжения роста. Наши исследования показали, что коэффициент напряженности роста в насаждении березы повислой (*B. pendula*) в возрасте 15 лет в контрольном варианте составляет  $130 \text{ см/см}^2$ , а к 30-летнему возрасту насаждения - снижается до  $21,0 \text{ см/см}^2$  (рис.3). В вариантах с нанесением на мело-мергельный грунт мелиоративных слоев показатель напряженности роста культур березы повислой (*B. pendula*) в 15-летнем возрасте существенно снижается. В возрасте 30 лет происходит снижение показателя в вариантах: с песчаным слоем - в 4,4 раза, с слоем суглинка 3,1 раза и с гу-

мусовым слоем в 2,4 раза. Таким образом, прослеживается общая закономерность снижения значения данного показателя при применении мелиоративного слоя на мело-мергельном грунте, что свидетельствует о большей устойчивости культур. Высокий коэффициент напряжения роста - свидетельствует о неблагоприятном водном режиме и недостаточной биологической устойчивости насаждений.

Динамика показателя коэффициента напряжения роста насаждений березы повислой (*B. pendula*) указывает на наиболее неблагоприятные лесорастительные условия для роста в контрольном варианте. Это подтверждается ранее проведенными исследованиями о лесопригодности мело-мергельного грунта в работах Панкова Я.В. (2003).

На рис. 4, 5 и 6 представлены графики хода роста березы повислой (*B. pendula*) и робинии псевдоакалии (*R. pseudoacacia*) по высоте и диаметру, диаграмма boxplot средний диаметр березы повислой (*B. pendula*) на техногенной почве с различным мелиоративным слоем. На графиках, представляющих хода роста по пятилетним возрастным группам в зависимости от применяемого мелиоративного слоя, прослеживается определенная зависимость. Уравнения полиномов второй и третьей степени ( $y = Ax^2 + Bx + c$ ,  $y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$ ) используются для описания графиков, где А, В, С, D – коэффициенты аппроксимации хода роста. Теоретические линии тренда, которые были созданы с помощью программного обеспечения, совпали с экспериментальными данными, что подтверждается коэффициентом достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,97...0,99$ .

Дисперсионный анализ показал, что применяемый мелиоративный слой оказывает существенное влияние на высоту культур березы повислой (*B. pendula*) ( $\eta = 35\%$ ) и диаметр ( $\eta = 36\%$ ). Критерий достоверности F показывает силу влияния фактора на рост ( $F = 16,18$  при  $F_{st} = 4,4$ ). Критерий достоверности силы влияния фактора на средний прирост по диаметру составляет  $F = 23,12$  при  $F_{st} = 4,4$ . Корреляционная связи при  $r = 0,7878$  является высокой тесной.

Для робинии псевдоакалии (*R. pseudoacacia*) проведенный анализ хода роста культур по высоте

показывает силу влияния фактора на средний прирост  $\eta = 33\%$ .  $F = 10,39$  при  $F_{st}=4.4$ . Однако, прирост по диаметру не показал существенного влияния мелиоративного слоя. Это можно объяснить особенностями биологии и экологии данного вида [3].

В контрольном варианте отмечается замедленный рост древесных пород. В первые 15 лет это особенно характерно. В этом возрасте культуры не превышают 1,5 м в высоту.

В последующем энергия роста культур возрастает в 3,0...3,3 раза до 20-летнего возраста и в дальнейшем сохраняется с тенденцией небольшого уменьшения. До 25...30-летнего возраста диаметр в 1,1...1,3 раза превышает показатели высоты, тогда как в условиях нормального роста отмечается обратное явление.

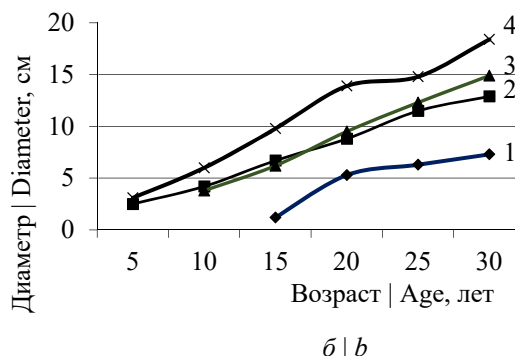
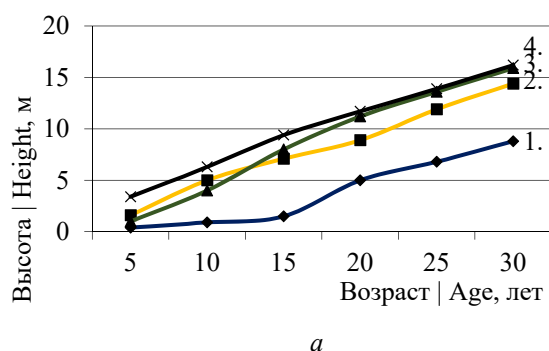


Рисунок 4. Изменение высоты (а) и диаметра на высоте 1,3 м (б) *B. pendula* в лесных культурах АМЛК объекта исследований: 1 – контрольный вариант; 2 – первый вариант мелиоративного субстрата; 3 – второй вариант мелиоративного субстрата; 4 – третий вариант мелиоративного субстрата

Figure 4. Increase in height (a) and diameter at a height of 1.3 m (b) *B. pendula* in forest crops of the AMLC of the research object: 1 – control variant; 2 – the first variant of the reclamation substrate; 3 – the second variant of the reclamation substrate; 4 - the third variant of the reclamation substrate

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

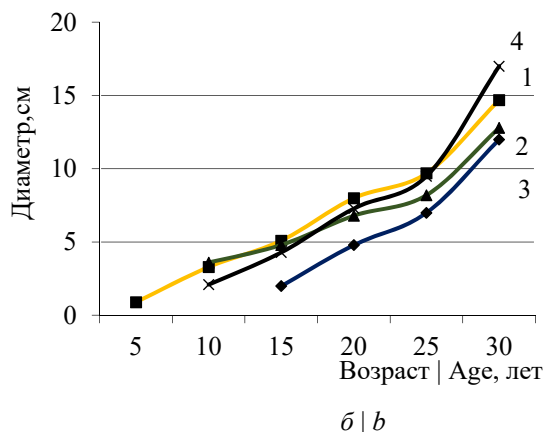
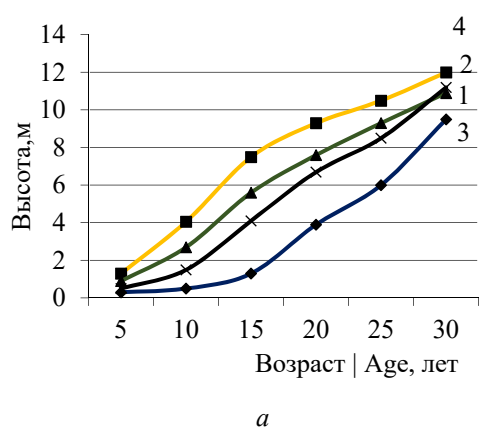


Рисунок 5. Изменение высоты (а) и диаметра на высоте 1,3 м (б) *R. pseudoacacia* в лесных культурах АМЛК объекта исследований: 1 – контрольный вариант; 2 – первый вариант мелиоративного субстрата; 3 – второй вариант мелиоративного субстрата; 4 – третий вариант мелиоративного субстрата

Figure 5. Increase in height (a) and diameter at a height of 1.3 m (b) *R. pseudoacacia* in forest crops of the AMLC of the research object: 1 – control variant; 2 – the first variant of the reclamation substrate; 3 – the second variant of the reclamation substrate; 4 - the third variant of the reclamation substrate

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

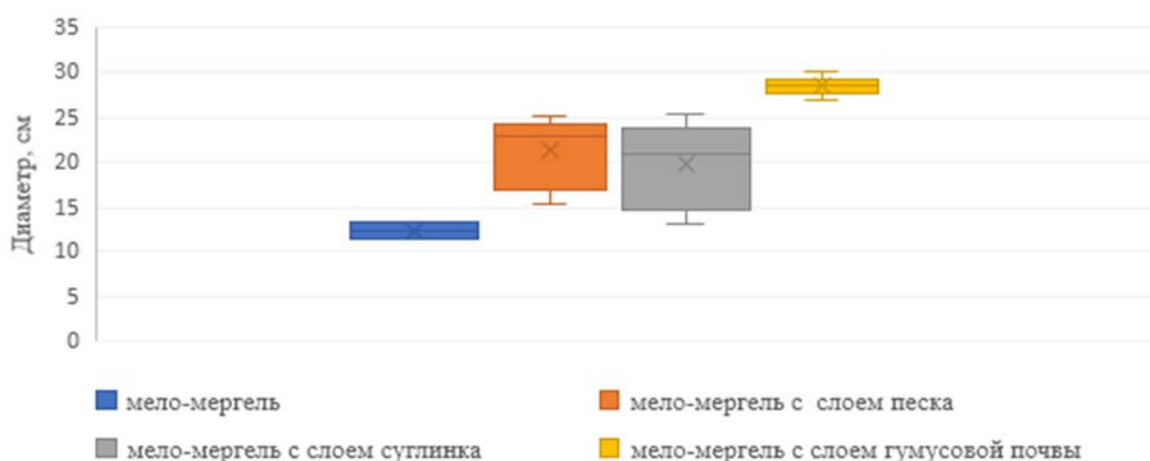


Рисунок 6. Боксплот-диаграмма среднего диаметра березы повислой (*B. pendula*) на различной техногенной почве

Figure 6. Boxplot diagram of the average diameter of *B. pendula* on the different types of technogenic soil

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

В варианте с песчаным мелиоративным слоем в 5-летнем возрасте высота насаждения березы повислой (*B. pendula*) и робинии псевдоакация (*R. pseudoacacia*) составляет 1,6...1,3 м. В 15-летнем возрасте средняя высота березы (*B. pendula*) достигала 7.1 м, что превышает показатели насаждения на мело-мергельном грунте в 4,7 раза. Робиния псевдоакация (*R. pseudoacacia*) – соответственно, 7,5 м, что больше в 5,7 раза по сравнению с контрольным вариантом. На техногенных почвах, сформированных с мелиоративным слоем суглинка и гумусированным слоем, прослеживается аналогичная закономерность. В варианте с мелиоративным слоем гумусированной почвы показатели роста, как по высоте, так и по диаметру превышают рост насаждений в варианте со слоем четвертичного суглинка. На техногенных почвах со слоем песчаных отложений энергия роста культур выше. На графике четко прослеживается доминирующее положение линии хода роста на протяжении всего 30-летнего периода по отношению к другим вариантам.

Применение мелиоративного слоя из песчаных отложений, четвертичного суглинка или гумусированной почвы значительно улучшает условия для роста. Наиболее благоприятные условия для роста культур формируются на техногенных почвах,

полученных из смеси мело-мергеля с гумусированным слоем.

### Выводы

Подтверждается возможность качественного улучшения условий произрастания растений на мело-мергельных отвалах посредством формирования на его поверхности мелиоративного слоя.

На техногенных мело-мергельных почвах Щигровского рудника Курской области, сохранность, ход роста и состояние насаждений березы повислой (*B. pendula*) и робинии псевдоакация (*R. pseudoacacia*) зависят от качественного состава применяемого мелиоративного слоя.

Наибольшая напряженность роста свойственна насаждениям, произрастающим на мело-мергеле, который характеризуется наиболее низким качественным потенциалом лесорастительных условий.

В условиях Курской области техногенные субстраты по степени и качеству лесопригодности располагаются в следующем порядке: чистый мело-мергельный субстрат, мело-мергель с песчаным слоем, мело-мергель с тяжелым по гранулометрическому составу суглинистым компонентом и мело-мергельный субстрат с плодородным гумусированным слоем.

## Список литературы

1. Androkhanov V. A., Boguslavsky A. E., Sokolov D. A. [et al.]. Soil-Ecological Assessment of Recultivation at the Spoils of Coal Deposits // *Chemistry for Sustainable Development*. 2023; 31 (1): 1–12. DOI: <http://doi.org/10.15372/CSD2023433>.
2. Гуркова Е. А., Андроханов В. А., Лавриненко А. Т. Ресурсы и специфика рекультивации отвалов угледобывающей промышленности Хакасии. Почвы и окружающая среда. 2020; 3 (4): e127. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v314.127>.
3. Деденко Т. П. Антропогенно-меловые ландшафты ЦЧР и их оптимизация для лесной рекультивации: моногр. Воронеж, 2019. 166 с.
4. Кушнир Е. А., Недбаев И. С., Трещевская Э. И. Оценка состояния лесных насаждений и почвенного покрова на участках рекультивации Кингисеппского месторождения фосфоритов // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2021, № 1. С. 68–80. DOI 10.21178/2079-6080.2021.1.68.
5. 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; 12: 44-55. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/4.
6. Мильков Ф. Н. Ландшафтная география : Избранные труды. Воронеж : Издательство Истоки, 2018. 382 с. ISBN 978-5-4473-0189-7. <https://www.elibrary.ru/FNEUWB>.
7. Михно, В. Б. Современные проблемы физической географии и ландшафтоведения / В. Б. Михно, А. С. Горбунов, О. П. Быковская. Воронеж : Воронежский государственный университет, 2020. 176 с. ISBN 978-5-9273-3063-8. URL: <https://www.elibrary.ru/hgqrws>.
8. Недбаев И. С., Елсукова Е. Ю. Изучение мирового и российского опыта по разработке оптимальных путей рекультивации нарушенных земель // *Вестник евразийской науки*. 2021; 13: 6. URL: <https://elibrary.ru/aicckp>.
9. Рост, состояние и продуктивность кустарниковых пород в условиях отвалов железорудных месторождений / Э. И. Трещевская, Е. Н. Тихонова, И. В. Голядкина, С. В. Трещевская, К. В. Лабоха, В. И. Князев // *Лесотехнический журнал*. 2022; 12: 60–76. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/5>.
10. Уфимцев В. И. Опыт и современное состояние лесной рекультивации в Кузбассе. *Сибирский лесной журнал*. 2017; 4: 12-27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=298675051>.
11. Pazur R., Liescovsky J., Burgi M. (et al.) Abandonment and recultivation of agricultural lands in Slovakia - patterns and determinants from the past to the future / *Land*, 2020; 316.
12. Bruno S., Mariangela G. Assessment of rehabilitation project result of a gold mine area using landscape function analysis. *Applied Geography*. 2019; 108: 22–29.
13. Csákvári E., Molnár Z., Halassy M. Estimates of regeneration potential in the Pannonian sand region help prioritize ecological restoration interventions. Global priority areas for ecosystem restoration. *Commun Biol* 5, 2022 : 1136. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42003-022-04047-8>.
14. Doddabasawa B., Chittapur B., Murthy M. Traditional agroforestry systems and biodiversity conservation. *Bangladesh Journal of Botany*. 2018. 47(4) : 927–930. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9377-4>.
15. Edraki M., Baumgartl T., Mulligan D., Fegan W., Munawar A. Geochemical Characteristics of Rehabilitated Tailings and Associated Seepages at Kidston Gold Mine, Queensland, Australia. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2019; 33; 2: 133–147. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1362542>.
16. Gautam S., Patra A. K., Sahu S. P., Hitch M. Particulate Matter Pollution in Opencast Coal Mining Areas: A Threat to Human Health and Environment. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2018; 32(2): 75–92. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1218110>.
17. Hu Z. Special Issue on Land Reclamation in Ecological Fragile Areas. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2018; 5; 1: 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0206-5>.
18. Kuznetsova I., Timofeeva S. Green technologies in land recultivation for coal mining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 1(408). DOI:10.1088/1755-1315/408/1/012075.



19. Macdonald S., Landhäuser S., Skousen J. (et al.) Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions. *New Forests*. 2015: 703-732. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9506-4>.
20. 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>.
21. Nurtjahya E., Franklin J. A. Some Physiological Characteristics to Estimate Species Potential as a Mine Reclamation Ground Cover. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019; 33: 75–86. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1333296>.
22. Santos P. Z. F. Can agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem service provision in agroforestry Landscapes meta-analysis for the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*. 2019. 433:140-145. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.064>.
23. Treschevskaya E., Tikhonova E., Golyadkina I., Malinina T. Soil development processes under different tree species at afforested post-mining sites. *FORESTRY-2018 of the journal IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 226. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012012>.
24. Yang K., Cattle S. R. Contemporary Sources and Levels of Heavy Metal Contamination in Urban Soil of Broken Hill, Australia after ad hoc Land Remediation. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2018; 32; 1: 18–34. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1208859>.

### References

1. Androkhanov V. A., Boguslavsky A. E., Sokolov D. A. [et al.]. Soil-Ecological Assessment of Recultivation at the Spoils of Coal Deposits // *Chemistry for Sustainable Development*. 2023: 31 (1): 1–12. DOI: <http://doi.org/10.15372/CSD2023433>.
2. Gurkova E. A., Androkhanov V. A., Lavrinenko A. T. Resources and specifics of recultivation of dumps of the coal mining industry of Khakassia. *Soils and environment*. 2020. Vol. 3. No.4. e127 DOI: 10.31251/pos.v3i4.127 (in Russian).
3. Dedenko T. P. Antropogennno-melovie landshafti CChR i ih optimizaciya dlya lesnoi rekultivacii : monogr. Voronej. 2019. 166 s. (in Russian).
4. Kushnir E. A., Nedbaev I. S., Treshchevskaya E. I. Assessment of the state of forest plantations and soil cover in the areas of reclamation of the Kingisepp phosphorite deposit // *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry No. 1, 2021*. pp. 68–80. DOI 10.21178/2079–6080.2021.1.68 (in Russian).
5. Malinina T. A., Golyadkina I. V., Tikhonova E. N., Dedenko T. P. Ocenka vodno-fizicheskikh svoystv tehnogennih substratov pri biologicheskoi rekultivacii otvalov KMA. *Lesotekhnicheskii zhurnal*. 2022; 12, 44–55 (in Russian). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/4.
6. Milkov F. N. *Landscape geography : Selected works*. Voronezh : Istoki Publishing House, 2018. 382 p. ISBN 978-5-4473-0189-7 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/FNEUWB>.
7. Mikhno V. B. *Modern problems of physical geography and landscape studies / V. B. Mikhno, A. S. Gorbunov, O. P. Bykovskaya*. Voronezh : Voronezh State University, 2020. 176 p. (in Russian). ISBN 978-5-9273-3063-8. URL: <https://www.elibrary.ru/hgqrws>.
8. Nedbaev I., Yelsukova E. Studying the world and Russian experience in developing optimal ways of recultivation of contaminated lands. *Bulletin of Eurasian Science*. 2021; 13 ; 6 (in Russian).
9. Growth, condition and productivity of shrubby rocks in the conditions of dumps of iron ore deposits / E. I. Treshchevskaya, E. N. Tikhonova, I. V. Golyadkina, S. V. Treshchevskaya, K. V. Labokha., V. I. Knyazev // *Forestry Journal*. 2022 ; 12 : 60–76 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/5> 10.
10. Ufimcev V. I. The experience and current state of forest reclamation in Kuzbass. *Sibirskij lesnoj zhurnal*. 2017; 4: 12-27. (In Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29867051>.

11. Pazur R., Liescovsky J., Burgi M. (et al.) Abandonment and recultivation of agricultural lands in Slovakia - patterns and determinants from the past to the future / *Land*, 2020; 316.
12. Bruno S., Mariangela G. Assessment of rehabilitation project result of a gold mine area using landscape function analysis. *Applied Geography*. 2019; 108: 22–29.
13. Csákvári E., Molnár Z., Halassy M. Estimates of regeneration potential in the Pannonian sand region help prioritize ecological restoration interventions. *Global priority areas for ecosystem restoration. Commun Biol* 5, 2022 : 1136. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42003-022-04047-8>.
14. Doddabasawa B., Chittapur B., Murthy M. Traditional agroforestry systems and biodiversity conservation. *Bangladesh Journal of Botany*. 2018. 47(4) : 927–930. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9377-4>.
15. Edraki M., Baumgartl T., Mulligan D., Fegan W., Munawar A. Geochemical Characteristics of Rehabilitated Tailings and Associated Seepages at Kidston Gold Mine, Queensland, Australia. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2019; 33; 2: 133–147. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1362542>.
16. Gautam S., Patra A. K., Sahu S. P., Hitch M. Particulate Matter Pollution in Opencast Coal Mining Areas: A Threat to Human Health and Environment. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2018; 32(2): 75–92. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1218110>.
17. Hu Z. Special Issue on Land Reclamation in Ecological Fragile Areas. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2018; 5; 1: 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0206-5>.
18. Kuznetsova I., Timofeeva S. Green technologies in land recultivation for coal mining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 1(408). DOI:10.1088/1755-1315/408/1/012075.
19. Macdonald S., Landhäuser S., Skousen J. (et al.) Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions. *New Forests*. 2015: 703-732. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9506-4>.
20. 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>.
21. Nurtjahya E., Franklin J. A. Some Physiological Characteristics to Estimate Species Potential as a Mine Reclamation Ground Cover. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2019; 33: 75–86. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1333296>.
22. Santos P. Z. F. Can agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem service provision in agriculture Landscapes meta-analysis for the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*. 2019. 433:140-145. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.064>.
23. Treschevskaya E., Tikhonova E., Golyadkina I., Malinina T. Soil development processes under different tree species at afforested post-mining sites. *FORESTRY-2018 of the journal IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 226. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012012>.
24. Yang K., Cattle S. R. Contemporary Sources and Levels of Heavy Metal Contamination in Urban Soil of Broken Hill, Australia after ad hoc Land Remediation. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2018; 32; 1: 18–34. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2016.1208859>.

### Сведения об авторах

✉ Деденко Татьяна Петровна – канд. с.-х. наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5914-1225>, e-mail: [dedenkotp@mail.ru](mailto:dedenkotp@mail.ru).

Тихонова Елена Николаевна – канд. биол. наук, зав. кафедрой ландшафтной архитектуры и почвоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9039-9822>. e-mail: [tichonova-9@mail.ru](mailto:tichonova-9@mail.ru).

*Малинина Татьяна Анатольевна* – канд.с.-х. наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5967-3336>; e-mail: malinina15@yandex.ru.

### Information about the authors

✉ *Tatiana P. Dedenko* – 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, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5914-1225>, e-mail: dedenkotp@mail.ru.

*Elena N. Tikhonova* – Cand. Sci. (Biol.), Head of Landscape Architecture and Soil Science Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-9039-9822>. e-mail: tikhonova-9@mail.ru

*Tatiana A. Malinina* – cand. Sci (Agric), associate professor, landscape architecture and soil science department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5967-3336>, e-mail: malinina15@yandex.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author



Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/3>

УДК 630\*228.82:630\*231:630\*524



## Структурно-функциональная организация естественных молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на 9-летней вырубке сосняка брусничникового Среднего Урала

Мария В. Ермакова, M58\_07E@mail.ru,   <https://orcid.org/0000-0002-9894-6587>

ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской Академии Наук», ул. 8 Марта, 202а, Екатеринбург, 620144, Российская Федерация

Изучение особенностей формирования структурно-функциональной организации молодых древостоев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в настоящее время, является одной из самых актуальных задач. Исследована структура естественного возобновления сосны на вырубке 9-летней давности в типе леса сосняк брусничниковый Среднего Урала. Закладка пробной площади, отбор модельных деревьев, образцов для определения базисной плотности древесины, распределение деревьев по ранговым классам и оценка изменчивости биометрических показателей проводилось по соответствующим методикам. У модельных деревьев измерялись диаметры ствола в коре и без коры на 0,1, 0,2...0,9 относительных высотах ствола и высота ствола. Определение объема ствола в коре и без коры у модельных деревьев сосны проводилось по простой и сложной формулам Губера. Установлено, на 9-й год после окончания вырубки леса на участке в типе леса сосняк брусничниковый структура подроста, в основном, была схожей со структурой подроста сосны, ранее установленной для сосняка ягодникового и сосняка разнотравного. Процесс естественного возобновления сосны на вырубке сосняка брусничникового продолжался в течение нескольких лет. Деревья сосны на 9-летней вырубке сосняка брусничникового по биологическому возрасту находятся в диапазоне 3-8 лет. Установлен очень высокий уровень изменчивости биометрических показателей и объема ствола в коре у деревьев сосны подроста. Характер распределения биометрических показателей, в основном, значительно отличался от параметров нормального распределения. Распределение по классам высоты, кроме того, позволило значительно снизить уровень изменчивости диаметров, высоты объема ствола в коре. Анализ модельных деревьев, выявил, что расхождения между объемом ствола как в коре, так и без коры определенные по сложной формуле и формуле срединного сечения Губера практически, не превышает  $\pm 5,0\%$ . Однако процент расхождения, постепенно увеличивается с уменьшением густоты подроста. Анализ показал, что у деревьев подроста сосны, со снижением густоты значительно возрастает содержание коры. В очень густом подросте содержание коры составляет примерно 1/12 от общего объема ствола в коре. Там, где подрост встречается единично (классификация подроста - практически отсутствует) объем коры достигает порядка 1/3 от общего объема ствола в коре. Большая часть запасов древесины как в коре, так и без коры приходится на деревья очень густого подроста. Изучение базисной плотности древесины показало, что величина этого показателя плавно и постепенно уменьшается от основания к верхней части ствола дерева. Независимо от густоты подроста, величина базисной плотности и характер ее изменения по относительным высотам ствола, были практически одинаковыми во всех вариантах густоты подроста.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, естественный молодняк, запас древесины, кора

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН Ботанический сад УрО РАН (регистрационный номер 1022040300042-6-1.6.19;1.6.14;4.1.2)

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

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

**Для цитирования:** Ермакова, М. В. Структурно-функциональная организация естественных молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на 9-летней вырубке сосняка брусничникового Среднего Урала // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 36–53. – Библиогр.: с. 50–53 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/3>.

*Поступила* 19.03.2024. *Пересмотрена* 28.03.2024. *Принята* 30.03.2024. *Опубликована онлайн* 17.06.2024.

### Article

## Structural and functional organization in natural young stand of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the 9-aged cuttings of *Pinetum vacciniosum* located on the Middle Ural

Maria V. Ermakova ✉, M58\_07E@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-9894-6587>

*Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, 8-March street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation*

### Abstract

The study of structural and functional organization of young pine stands is one of the pressing problems of modern forestry. The spatial pattern of pine stands naturally recovering 9 years after clear-cutting in the lingonberry pine forest type at the Middle Urals was studied. The establishing a trial plot, selecting model trees, determination basic wood density, assessing trees ranking and analyzing the variability of biometric indicators were fulfilled using appropriate methods. For model trees, trunk height as well as diameter of trunk in bark and without bark were measured at 0.1, 0.2...0.9 of relative heights. Trunk volumes of model pine trees were calculated using the simple and complex Huber formula. It was established that 9 years after clear-cutting the structure of the pine young growth in the lingonberry pine forest was similar to the spatial pattern previously established for pine young growth in the berry pine forest and the mixed-grass pine forest. Natural regeneration of pine trees at the felled areas in lingonberry pine forests continued for several years. Pine trees at the felled areas were at the age of 3-8 years. A very high level of variability in biometric parameters and trunk volumes in the bark of young pine trees has been established. In general, the distribution of biometric indicators was significantly different from normal. Ranking trees according to height classes made it possible to significantly reduce the level of variability in the diameter, height, and volume of the trunk in the bark. Analysis of model trees revealed that the discrepancies between trunk volume values in the bark and without the bark, determined by the complex Huber formula and the Huber median section formula, did not exceed  $\pm 5.0\%$ . However, the percentage of discrepancy increases gradually with decreasing density of young growth. In young pine trees the bark content increases significantly with a decrease in density of young growth. In very dense young growth, the bark content is approximately 1/12 of the total trunk volume. In areas with practically no undergrowth, the volume of the bark reaches almost 1/3 of the total trunk volume. It has been established that most of the wood reserves, in tree trunks both with bark and without bark, are found in very dense young growth. Basic density of the wood gradually decreased from the base to the top of the tree trunk. The values of the basic density of the wood and the nature of its change according to the relative heights of the trunk were the practically same in all variants of young growth density.

**Keywords:** *Scots pine, natural forest growth, wood supply, bark*

**Funding:** The work was carried out within the framework of the State task of the FGBUN Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (registration number 1022040300042-6-1.6.19;1.6.14;4.1.2)

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

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

**For citation:** Ermakova M. V. (2024). Structural and functional organization in natural young stand of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the 9-aged cuttings of *Pinetum vacciniosum* located on the Middle Ural. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 36-53 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/3>.

*Received* 19.03.2024. *Revised* 28.03.2024. *Accepted* 30.03.2024. *Published online* 17.06.2024.

## Введение

Изучение воздействия разнообразных биотических и абиотических факторов, в том числе, связанное с изменениями климата, требует развития и совершенствования методологии изучения изменений лесной растительности.

Вследствие этого, вопросы, связанные с исследованием различных особенностей восстановления древесной растительности на обезлесенных территориях, могут рассматриваться как одни из наиболее актуальных.

Причины уничтожения лесной растительности могут быть самые разнообразные – пожары, вырубка и т.д. Это определяет необходимость проведения комплексных исследований динамики первоначальных этапов формирования структуры и фитомассы древесной растительности на территориях, лишившихся лесной растительности в силу разнообразных причин [1, 2].

Однако необходимо отметить, что изучение динамики формирования структурно-функциональной организации древесной растительности и динамики ее фитомассы на первоначальных этапах усложнено по ряду причин. Основным способом восстановления сосняков Среднего Урала к настоящему времени, с учетом лесорастительных условий, является естественное лесовосстановление. Так, количественные показатели естественного возобновления для различных лесорастительных условий изучены достаточно подробно [3-9]. Исследования по этому вопросу проводились на высоком уровне в течение нескольких десятилетий. В тоже время, необходимо сказать, что данные о количественных показателях, это только один параметров оценки эффективности лесовосстановления на обезлесенных территориях. В свою очередь, вопросы, связанные, со структурой и запасом фитомассы молодых древостоев на начальных этапах их формирования, исследованы значительно меньше, [1,2,10,11] поскольку,

ранее им, в силу определенных причин, практически не уделялось внимание.

Ранее, нами были исследованы и установлены особенности формирования структурно-функциональной организации естественных молодняков сосны в междурядьях лесных культур сосны в условиях сосняка ягодникового и сосняка разнотравного на вырубках Среднего Урала [10]. В продолжение этих исследований, было проведено, в том же районе, изучение основных направлений формирования структурно-функциональной организации естественных молодняков сосны на вырубке сосняка брусничникового с привлечением модельных деревьев. Выбор объекта обусловлен тем, что для условий Среднего Урала, сосняк брусничниковый является наиболее оптимальным типом леса для естественного возобновления сосны [12].

Изучение структурно-функциональной организации естественных молодняков и исследование модельных деревьев позволит более тщательно оценить возможности использования наиболее простого метода определения объема древесины в коре, установить объемы древесины без коры и определить содержание коры, полндревесности стволов и параметров базисной плотности древесины для маломерных деревьев. Это несомненно является актуальной задачей, которая позволит получить новые данные о параметрах и динамике естественного восстановления древесной растительности на обезлесенных территориях в условиях Среднего Урала.

## Материалы и методы

Цель исследования – изучить особенности структурно-функциональной организации сосняка брусничникового, на основе анализа модельных деревьев определить объемы стволовой древесины в коре и без коры, установить долю коры в общем объеме ствола в коре, изучить показатели базисной плотности древесины ствола.

Объект исследований – естественный молодняк сосны обыкновенной на вырубке в типе леса сосняк брусничниковый (С бр.) Зауральской холмисто-предгорной провинции южнотаежного округа Средне-Уральского таежного лесорастительного района [12]. Вырубка леса на площади (площадь вырубки более 15 га) проводилась за 9 лет до проведения исследований.

Исследования на пробной площади (ПП) проводились на основании имеющихся требований [7, 8]. На ПП закладывались по трансекте участки размером 5х5 м (всего заложено 25 участков) на которых учитывались все имеющиеся деревья сосны. У каждого дерева измерялись диаметры на 0,1 и 0,5 высоты ствола ( $D_{0,1H}$  и  $D_{0,5H}$ ) и высота ( $H_{ств.}$ ). Для установления возраста, у всех деревьев тщательно определялось число годичных побегов. Для уточнения возраста использовались также данные модельных деревьев [14].

Распределение деревьев по ранговым классам и оценка изменчивости биометрических показателей проводились по соответствующим методикам [15,16].

Для отбора модельных деревьев сосны на ПП были выделены отдельные участки (ОУ) с различной густотой подроста: 1. очень густой – больше 10 тыс. экз. на 1 га; 2. густой – 5-10 тыс. экз. на 1 га; 3. средней густоты – 3-5 тыс. экз. на 1га; 4. редкий – 1-3 тыс. экз. на 1 га и 5. - практически отсутствует – менее 1 тыс. экз. на 1га [13].

На каждом ОУ методом случайной выборки было отобрано по 50 экземпляров деревьев сосны. Сразу же после отбора у каждого деревца определялась высота ствола. Измерялись диаметры ствола в коре на 0,1, 0,2...0,9 относительных высотах ствола. После удаления коры снова измерялись диаметры на тех же отметках.

Для измерения диаметров использовался цифровой штангенциркуль ADA Mechanic 150 PRO A00380 с точностью измерения  $\pm 0,03$  мм. Для измерения высоты и относительной высоты металлическая линейка с точностью измерения 0,1 мм.

Определение объема ствола в коре и без коры, проводилось по двум вариантам:

1) по сложной формуле Губера:

Объем ствола =  $(\gamma_{0,1} + \gamma_{0,2} + \dots + \gamma_{0,9}) * L + V$  верш. (1),

где:  $\gamma_{0,1}, \gamma_{0,2} \dots \gamma_{0,9}$  – площадь сечения ствола на середине каждого отрезка относительной высоты ствола; L – длина всех годичных побегов до вершинки; V верш. – объем вершинки.

2) по простой формуле Губера:

Объем ствола =  $\gamma_{0,5H} * H$  ств. (2)

где:  $\gamma_{0,5H}$  – площадь сечения ствола на середине высоты; H ств. – высота ствола.

Истинное видовое число –  $\lambda_{0,1}$  для стволов в коре и без коры рассчитывалось по формуле Гогеналля.

Кроме того, у каждого дерева, отбирались образцы древесины на отметках 0,0; 0,1; 0,25; 0,5 и 0,75 высоты ствола. На образцах древесины проводилось определение базисной плотности древесины по методу максимальной влажности [17].

Сравнение средних проводилось с помощью t-критерия Стьюдента и LSD-теста. Полученные данные обрабатывались с помощью пакета программ Excel и STATISTICA 10 [18].

### Результаты

Анализ полученных данных показал, что, среднее количество подроста на ПП вырубки сосняка брусничникового составило в среднем 13,8 тыс. экз. на 1 га. В целом, на 9-й год после вырубки леса, таксационные характеристики подроста сосны (табл. 1) демонстрировали очень высокий уровень изменчивости биометрических показателей. Характер распределения биометрических показателей, в большинстве случаев, значительно отличался от параметров нормального распределения (в соответствии с показателями асимметрии и эксцесса с учетом их ошибок), что свидетельствует об интенсивном процессе дифференциации деревьев в формирующемся молодом древостое. Соответственно, что результате этого наблюдается и крайне высокая изменчивость и по объему ствола.

Биометрические характеристики подроста сосны на вырубке сосняка брусничникового

Table 1

Biometric characteristics of pine undergrowth in the clearing of a cowberry pine forest

Статистики / Statistics	Показатель / Index			
	Д <sub>0,1Н</sub> , см / D <sub>0,1Н</sub> , cm	Д <sub>0,5Н</sub> , см / D <sub>0,5Н</sub> , cm	Н <sub>ств.</sub> , см / H <sub>stem</sub> , cm	Объем ств., см <sup>3</sup> / Trunk volume, cm <sup>3</sup>
M ± m	0,6 ± 0,06	0,4 ± 0,04	0,6 ± 0,06	0,6 ± 0,06
min-max	0,3-1,6	0,1-1,00	6,0-81,0	0,04-63,9
V, %	61,42	58,04	61,80	150,68
As	1,177	0,873	0,658	1,849
Ex	0,513	-0,755	-0,722	2,554

Примечание. M ± m – среднее и ошибка среднего; min-max – минимальная и максимальная величина параметра; V, % - коэффициент вариации; As – асимметрия (m<sub>ax</sub> – ошибка асимметрии = 0,3699); Ex -эксцесс (m<sub>ex</sub> – ошибка эксцесса = 0,7244)

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Такие уровни вариабельности по биометрическим характеристикам и объему ствола можно объяснить, в определенной степени, генотипическими и ценоотическими факторами формирования подроста.

Не менее важным фактором, на наш взгляд, является возрастная структура подроста (рис. 1), что подтверждается также и другими литературными данными [19-24].

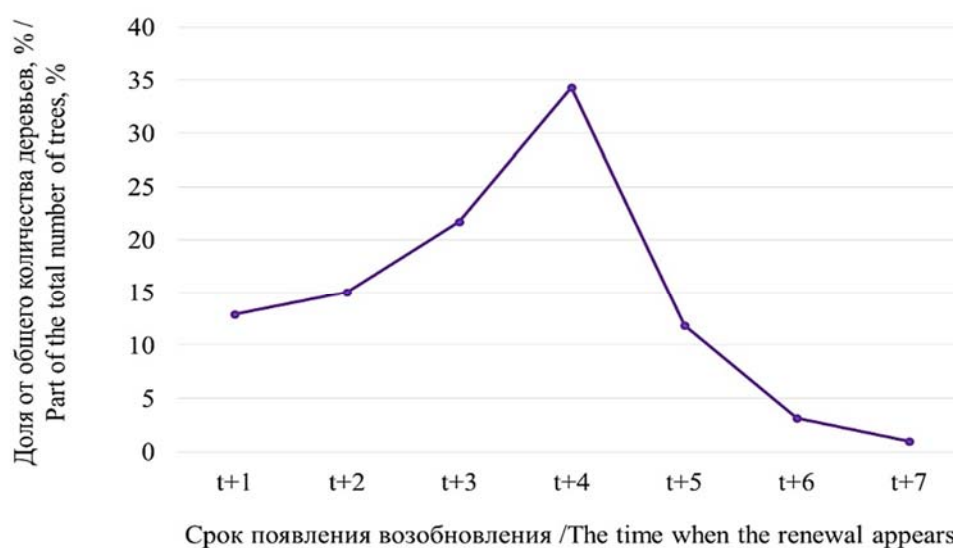


Рисунок 1. Возрастная структура подроста сосны на вырубке сосняка брусничникового (t – год прекращения рубки; t+1 – деревья подроста, из всходов, появившихся через 1 год после прекращения рубки и т.д.)

Figure 1. Age structure of pine undergrowth on cutting down of cowberry pine forest (t – year of cessation of felling; t+1 – trees of undergrowth, from sprouting appeared 1 year after cessation of felling etc.)

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations



Появление всходов, из которых сформировались деревья подроста, наблюдалось с первого года после прекращения рубки и продолжалось в течение 7-и лет. Таким образом, разница в возрасте, между деревьями подроста из всходов, появившихся в первый год и деревьями, появившимися в конце процесса заселения, составляет 5-6 лет. Однако, следует заметить, что большая часть подроста сформировалась из всходов проявившихся на 3-й и, в особенности на 4-год, после прекращения рубки (разница в возрасте с деревьями, появившимися в первый год, после прекращения рубки составляет 2-3 года).

Именно, такая разница в возрасте между деревьями подроста и обуславливает очень высокую изменчивость биометрических показателей и объема стволов.

Вследствие возрастной составляющей, распределение деревьев по ранговым классам высоты, демонстрирует довольно высокую амплитуду редукционных чисел – 2,132. Соответственно, и распределение деревьев подроста по ранговым классам высоты, в целом, не соответствует характеру нормального распределения, которое, например, наблюдается в схожих по возрасту лесных культурах [10].

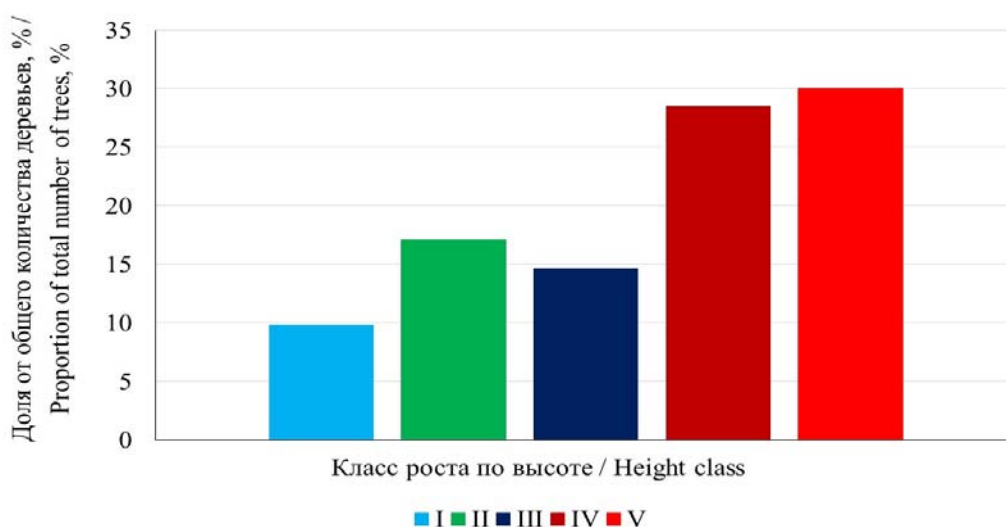


Рисунок 2. Распределение деревьев в молодняках сосны на вырубках (I...V – ранговые классы по высоте ствола)

Figure 2. Distribution of trees in young pine forests in clearings (I...V - rank classes according to the height of the trunk)

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

Как показал, анализ полученных данных (рис. 3), деревья сосны в разных ранговых классах значительно различаются (при  $p \leq 0,05$ ) как по средней высоте ствола, так и по средней величине диаметров на 0,1 и 0,5 высоты ствола и объема ствола (рис. 3).

Распределение по классам высоты, кроме того, позволило значительно снизить уровень изменчивости диаметров и высоты – с очень высокого

до среднего и повышенного (рис. 4). По величине объема ствола также в некоторых классах (I и IV-м) отмечалось снижение уровня изменчивости с очень высокого до среднего и повышенного. В свою очередь, хотя в других классах высоты (II, III и V-м), уровень изменчивости оставался очень высоким, но все же, величина коэфф ициента вариации оказалась значительно ниже, чем в целом по подросту.

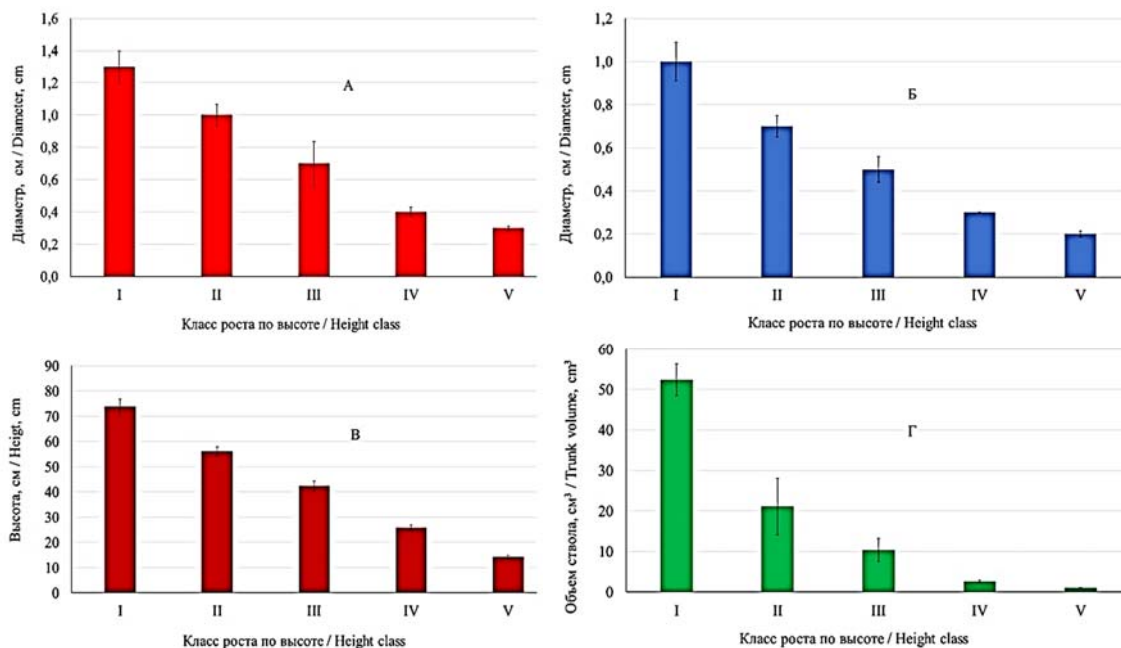


Рисунок 3. Биометрические характеристики деревьев сосны в молодняках на момент учета (А –  $D_{0,1H}$ ; Б-  $D_{0,5H}$ ; В – высота ствола; Г – объем ствола)

Figure 3. Biometric characteristics of pine trees in young stands at the time of registration (A –  $D_{0,1H}$ ; Б -  $D_{0,5H}$ ; В – height; Г - trunk volume)

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

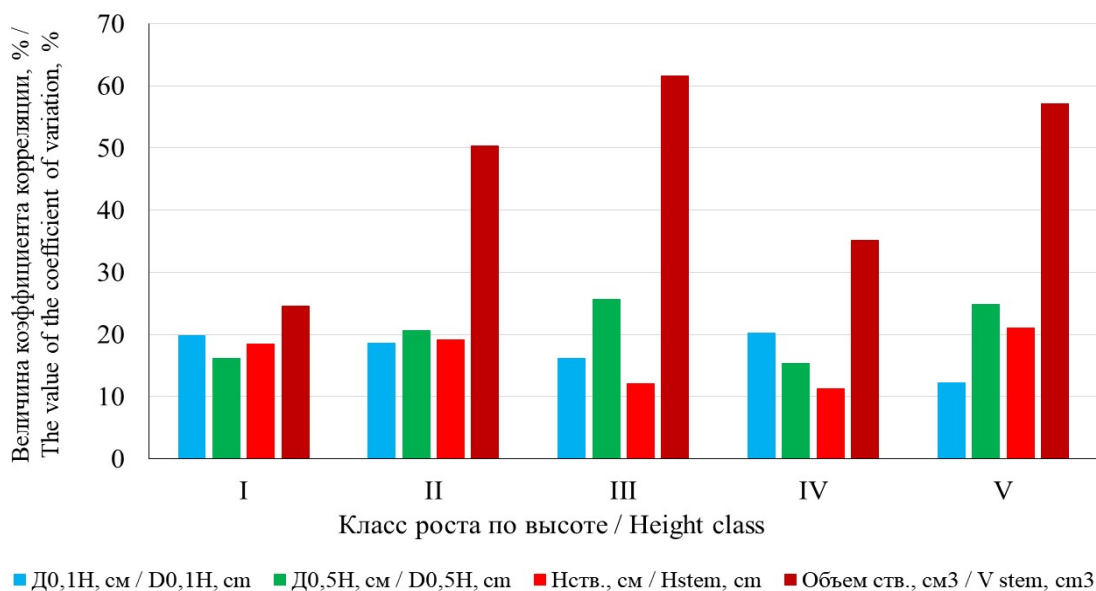


Рисунок 4. Величина коэффициента вариации по показателям (Figure 4. The value of the coefficient of variation for indicators)

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

Полученные данные свидетельствуют о том, что процессы формирования подроста сосны на вырубке в типе леса сосняк брусничниковый имеют значительное сходство, с ранее рассмотренными, особенностями процесса формирования естественных молодняков в междурядьях лесных культур на

вырубках в типах леса сосняк ягодниковый и сосняк разнотравный, а также в других лесорастительных условиях [10, 23, 24].

Параметры отобранных модельных деревьев сосны представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики места отбора и параметры модельных деревьев

Table 2

Characteristics of the sampling site and parameters of model trees

Классификация подроста / Classification of forest undergrowth	Расстояние от стены леса, м / Distance from the forest wall, m	Густота подроста, экз. на 1 га / Density of undergrowth, copies on 1 hectare	Возраст деревьев, лет (мин.-макс.) / Age of trees, years (min.-max.)	Показатель, мин.-макс. / Index, min-max		
				Д <sub>0,1Н</sub> , см / D <sub>0,1Н</sub> , cm	Д <sub>0,5Н</sub> , см / D <sub>0,5Н</sub> , cm	Н <sub>ств.</sub> , см / H <sub>stem</sub> , cm
Очень густой / Very thick	5-55	18500	5-8	0,60-0,63	0,36-0,41	53-71
Густой / Thick	55-75	10055	5-7	0,35-0,58	0,23-0,43	39-56
Средней густоты / Medium thickness	75-110	7200	5-6	0,26+0,58	0,18-0,32	24-56
Редкий / Sparse stand	110-150	1780	4-5	0,22-0,38	0,14-0,23	19-36
Практически отсутствует / Practically absent	150-200	545	3-4	0,22-0,32	0,14-0,21	14-30

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

Следует отметить, что в очень густом подросте, недалеко от стены леса, встречались самые большие по высоте и возрасту деревья сосны. Напротив, в значительном отдалении от стены леса, в условиях практически полного отсутствия подроста отмечались наиболее молодые деревца небольшой высоты.

Результаты, полученные при анализе данных модельных деревьев, показали, что между объемом ствола как в коре, так и без коры, определенные по сложной формуле и формуле срединного сечения Губера характеризуются очень сильной корреляционной связью (табл. 3).

Различие в величинах объема ствола как в коре, так и без коры, определенных по сложной фор-

муле и по формуле срединного сечения Губера является незначительным и, практически, не превышает  $\pm 5,0$  %. Однако, обращает на себя внимание, что процент расхождения, постепенно увеличивается с уменьшением густоты подроста (табл. 3). Также установлена сильная линейная связь между объемом ствола без коры и в коре как при определении объема по сложной формуле, так и по формуле срединного сечения (табл. 4).

Несмотря на сильную связь во всех случаях, необходимо отметить, что величина коэффициента корреляции, в данном случае, постепенно уменьшается при снижении густоты подроста.

Показатели связи между объемом ствола, определенным, по сложной и простой формуле Губера  
(при  $p \leq 0,05$ )

Indicators of the relationship between trunk volume determined using the complex and simple Huber formula  
(at  $p \leq 0,05$ )

Классификация подроста / Classification of forest undergrowth	Уравнение связи / The equation of connection	R (Коэффициент корреляции / Correlation co- efficient)	Расхождение по рассчитанным объемам ствола, % / Discrepancy in calculated volumes of trunk, %
Объем ствола в коре / Trunk volume in bark			
Очень густой / Very thick	$y = -0,0746 + 1,1204x$	0,998	$\pm 1,3$
Густой / Thick	$y = -0,0646 + 1,0235x$	0,998	$\pm 3,1$
Средней густоты / Medium thickness	$y = -0,0223 + 1,1022x$	0,996	$\pm 3,7$
Редкий / Sparse stand	$y = -0,0464 + 1,0477x$	0,995	$\pm 4,6$
Практически отсутствует / Practically absent	$y = 0,0146 + 0,9793x$	0,951	$\pm 5,1$
Объем ствола без коры / Trunk volume without bark			
Очень густой / Very thick	$y = -0,0443 + 1,0403x$	0,992	$\pm 0,4$
Густой / Thick	$y = -0,0407 + 1,0227x$	0,991	$\pm 4,6$
Средней густоты / Medium thickness	$y = 0,0228 + 0,9881x$	0,989	$\pm 4,7$
Редкий / Sparse stand	$y = -0,0054 + 0,9993x$	0,980	$\pm 5,1$
Практически отсутствует / Practically absent	$y = 0,0158 + 0,9791x$	0,976	$\pm 5,2$

Примечание:  $y$  – объем ствола, рассчитанный по формуле срединного сечения (простая формула Губера);  
 $x$  – объем ствола, рассчитанный по сложной формуле Губера.

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Показатели связи между объемом ствола в коре и без коры (при  $p \leq 0,05$ )

Table 4

Indicators of the relationship between the volume of the trunk in the bark and without the bark (at  $p \leq 0,05$ )

Классификация подроста / Classification of forest undergrowth	Уравнение связи / The equation of connection	R (Коэффициент корреляции / Correlation coefficient)
По сложной формуле Губера / According to Huber's complex formula		
Очень густой / Very thick	$y = -0,0643 + 0,8703x$	0,980
Густой / Thick	$y = -0,0492 + 0,8524x$	0,978
Средней густоты / Medium thickness	$y = -0,0195 + 0,8056x$	0,976
Редкий / Sparse stand	$y = -0,0121 + 0,7712x$	0,960
Практически отсутствует / Practically absent	$y = -0,0103 + 0,7266x$	0,951
По формуле срединного сечения Губера / According to Huber's median section formula		
Очень густой / Very thick	$y = 0,0943 + 0,8703x$	0,972
Густой / Thick	$y = 0,0915 + 0,8719x$	0,968
Средней густоты / Medium thickness	$y = 0,0027 + 0,7964x$	0,963
Редкий / Sparse stand	$y = -0,0173 + 0,7703x$	0,956
Практически отсутствует / Practically absent	$y = 0,0074 + 0,7084x$	0,951

Примечание.  $y$  – объем ствола без коры;  $x$  – объем ствола в коре,  $\text{см}^3$ ;

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Анализ истинных видовых чисел –  $\lambda_{0,1}$ , которые можно рассматривать как, своего рода, показатель полндревесности ствола, показал (рис. 5), что в условиях очень густого подроста отмечаются достоверно самые низкие значения этого показателя. Таким образом, в условиях очень густого подроста наблюдается самая низкая полндревесность стволов деревьев по сравнению с деревьями других вариантов густоты. В условиях практически отсутствия подроста для стволов деревьев, как в коре, так и без коры, наблюдаются, напротив, достоверно самые высокие показатели  $\lambda_{0,1}$  по сравнению со всеми остальными вариантами густоты подроста, т.е.

очень редко расположенные деревья подроста демонстрируют наибольшую полндревесность среди всех вариантов. Для густого, средней густоты и редкого подроста не выявлено значительных различий в величине  $\lambda_{0,1}$  стволов деревьев как в коре, так и без коры, но четко просматривается тенденция возрастания этого показателя с уменьшением густоты подроста. Подобное изменение величины  $\lambda_{0,1}$  стволов деревьев как в коре, так и без коры при очень высокой густоте подроста, вероятно, связано с усиленным ростом в высоту такой светолюбивой древесной породы, как сосна.

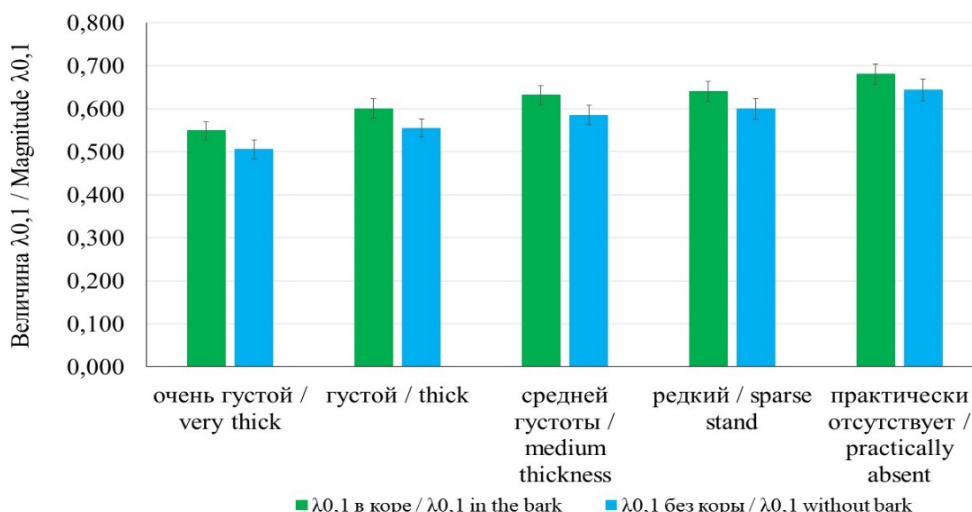


Рисунок 5. Показатели истинных видовых чисел у модельных деревьев при разной густоте подраста

Figure 5. Indicators of true species numbers in model trees at different densities of undergrowth

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Установлено, что у деревьев подраста сосны со снижением густоты значительно (при  $p \leq 0,05$ ) возрастает содержание коры (рис. 6). Это вполне объясняется, как дополнительное формирование защитного покрытия стволиков деревьев при ухудшении ценологических условий произрастания при снижении густоты подраста. У деревьев сосны в очень

густом подрасте содержание коры составляет примерно 1/12 от общего объема ствола в коре. В свою очередь, у отдельно стоящих деревьев (категория – подрост практически отсутствует), объем коры достигает практически 1/3 от общего объема ствола в коре.

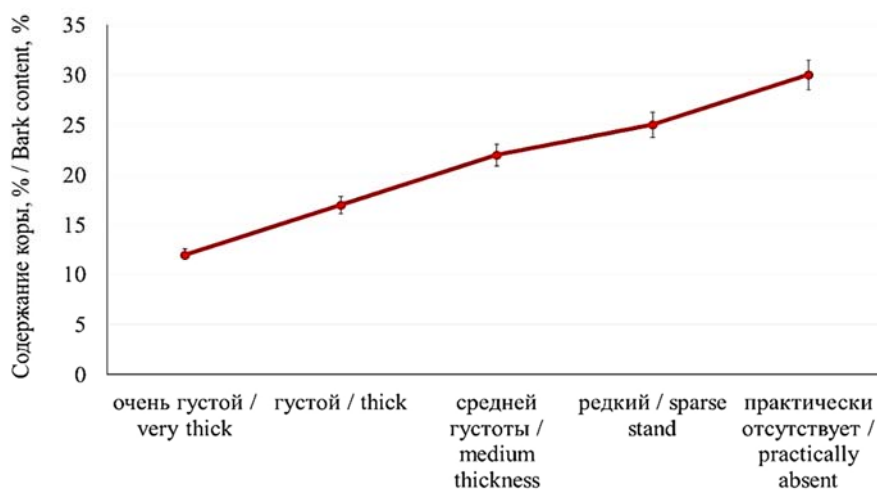


Рисунок 6. Изменение содержания коры у деревьев сосны при изменении густоты подраста

Figure 6. Changes in the bark content of pine trees with changes in the density of undergrowth

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

В качестве примера, на основании полученных данных нами были рассчитаны (в расчете на 1 га) запасы древесины и коры для всей совокупности деревьев подроста на ПП (табл. 5). Как видно из данных табл. 5, большая часть запасов древесины как в коре, так и без коры продуцируется деревьями

очень густого подроста, несмотря на самую низкую полндревесность стволов среди деревьев всех категорий густоты. Также большая часть запаса коры отмечена для этой категории подроста, хотя как было сказано ранее, здесь наблюдается самый низкий процент содержания коры.

Таблица 5

Запасы древесины ствола в коре и коры деревьев сосны на ПП, см<sup>3</sup>

Table 5

Trunk wood reserves in the bark and bark of pine trees

Классификация подроста / Classification of forest undergrowth	Содержание коры в среднем / Bark content is average	Запас древесины, см <sup>3</sup> / Wood stock, cm <sup>3</sup>		
		стволов в коре / trunks in the bark	стволов без коры / trunks without bark	коры / bark
Очень густой / Very thick	12	9597	8445	1152
Густой / Thick	17	6366	5284	1082
Средней густоты / Medium thickness	21	3846	3038	808
Редкий / Sparse stand	25	3936	2052	984
Практически отсутствует / Practically absent	30	2469	1728	741
Всего / Total	18	26214	21447	4767

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Кроме того, проведенное исследование величины базисной плотности древесины показало, что во всех случаях, величина этого показателя плавно и постепенно уменьшается от основания к верхней части ствола дерева (рис. 7).

Обращает на себя внимание, что независимо от густоты подроста, величина базисной плотности и характер ее изменения по относительным высотам

ствола, были практически идентичными во всех вариантах густоты подроста. По всей видимости, величина базисной плотности древесины деревьев подроста, в первую очередь, определяется генотипическими особенностями популяции, являющейся источником естественного возобновления и, только отчасти, в небольшой степени, ценотическими условиями произрастания.

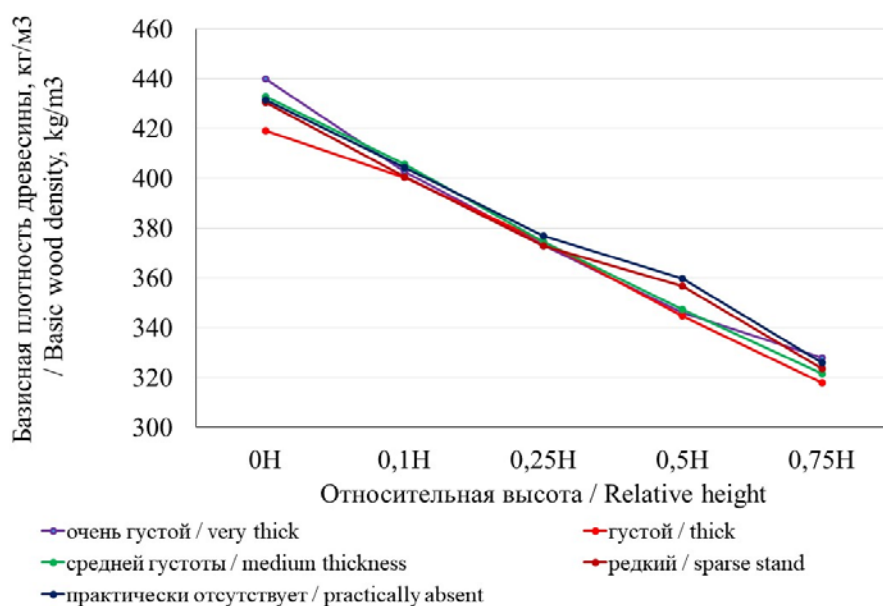


Рисунок 7. Изменение величины базисной плотности древесины деревьев сосны при различной густоте подроста

Figure 7. Changes in the value of the basic wood density of pine trees at different densities of undergrowth

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

### Обсуждение

По нашему мнению, удалось во многом решить задачи, поставленные в нашей работе. Однако, до настоящего времени, остается еще очень много вопросов, связанных с таксацией маломерных деревьев, особенно на начальных этапах лесовозобновления. Следует отметить что наиболее важные исследования таксации молодняков (Поликарпов, 1962; Шагин, 1970; Моисеев, 1971:) в первую очередь затрагивали методические вопросы проведения таксационных исследований в целях повышения точности определения количественных показателей подроста и его биометрических показателей, установления его состава. Что касается, более подробного изучения структуры молодняков, то следует упомянуть исследования Е.П. Маслакова (1984) и В.М. Соловьева (2001), в которых более подробно рассмотрены и определены основные методические подходы именно к изучению структуры молодняков сосны. Однако, в данных исследованиях при изучении естественных молодняков сосны практически не рассматривается весьма важный, на наш взгляд, вопрос возрастной структуры подроста сосны.

Соответственно, по-прежнему, остается очень слабоизученным вопрос оценки фитомассы молодых древостоев, особенно на самых ранних этапах формирования, поскольку эта задача ранее практически не рассматривалась. В частности, в работе Н.П. Поликарпова (Формирование сосновых молодняков на концентрированных вырубках, 1962) автором целенаправленно исключен вопрос изучения объемов стволов в силу очень высокой вариабельности этого показателя.

Как один из моментов решения этой проблемы можно считать проведенное нами сравнительное изучение определения объемов стволов в коре и без коры по сложной и простой формуле Губера. Сравнительный анализ показал, что расхождение в данном случае не превышает 5 %, т.е. простая формула срединного сечения, как наиболее технически простой способ определения объема ствола вполне подходит для работы с маломерными деревьями. Кроме того, установленная нами связь между густотой подроста сосны и содержанием коры обуславливает необходимость более тщательного подхода при изучении накопления фитомассы древесной растительности на начальных этапах роста и



развития. Рассмотренная в данной работе, методика изучения структурно-функциональной организации молодых древостоев на ранних этапах формирования, в существенной степени, носит региональный характер, определяемый лесорастительными условиями региона, и пока не адаптирована к иным лесорастительным условиям. Особенно важно, на наш взгляд, в дальнейшем разработать обобщенные таксационные методики исследования маломерных деревьев и оценки структурно-функциональной оценки молодых, формирующихся древостоев.

### Выводы

1. На 9-й год после вырубki леса в типе леса сосняк брусничниковый, биометрические показатели и объем ствола в коре у деревьев подростa сосны отличаются очень высоким уровнем изменчивости. Распределение биометрических показателей и объема ствола в коре, в большинстве случаев, отличается от параметров нормального распределения. Разница в возрасте между деревьями подростa является причиной очень высокой изменчивости биометрических показателей и объема стволов. Формирование подростa сосны на вырубке в типе леса сосняк брусничниковый соответствует процессами формирования, ранее рассмотренных, естественных молодняков на вырубках в типах леса сосняк ягодниковый и сосняк разнотравный

2. Появление всходов сосны наблюдалось с первого года после прекращения рубки и продолжалось в течение 7-и лет. Самая большая часть деревьев подростa представлена возобновлением, проявившимся на 3-й и, в особенности на 4-год, после прекращения рубки.

Разница в возрасте, между деревьями подростa из всходов, появившихся в начале и появившихся, в конце процесса заселения, составляет 5-6 лет.

3. Распределение деревьев по ранговым классам высоты, демонстрирует довольно высокую амплитуду редуцированных чисел – 2,132. Распределение деревьев подростa по ранговым классам высоты, в целом, не соответствует параметрам нормального распределения. Деревья сосны в разных ранговых классах существенно различаются как по средней высоте ствола, так и по средней величине диаметров на 0,1 и 0,5 высоты ствола и объема ствола (Рис.3).

Распределение по классам высоты, значительно снижает уровень изменчивости диаметров и высоты ствола – с очень высокого до среднего и повышенного. По величине объема ствола наблюдается, в ряде случаев, снижение уровня изменчивости с очень высокого до среднего и повышенного. В остальном, уровень изменчивости по объему ствола остается очень высоким.

4. Установлено, что независимо от густоты подростa, у деревьев сосны существует очень сильная корреляционная связь между объемом ствола, как в коре, так и без коры, определенных по сложной формуле Губера и формуле срединного сечения Губера. Отклонения в величинах объема ствола как в коре, так и без коры определенными по сложной формуле и по формуле срединного сечения Губера постепенно увеличивается с уменьшением густоты подростa, но практически не превышает  $\pm 5,0\%$ . Установлена сильная линейная связь между объемом ствола без коры и в коре как при определении объема по сложной формуле Губера, так и по формуле срединного сечения Губера. Величина коэффициента корреляции, в данном случае, постепенно уменьшается при снижении густоты подростa.

5. В условиях очень густого подростa отмечаются достоверно самые низкие значения истинных видовых чисел –  $\lambda_{0,1}$  как для стволов в коре, так и для стволов без коры.

В условиях очень густого подростa наблюдается самая низкая полндревесность стволов деревьев по сравнению с деревьями других вариантов густоты. В условиях практически отсутствия подростa для стволов деревьев, как в коре, так и без коры, отмечаются достоверно самые высокие показатели  $\lambda_{0,1}$  и самая большая полндревесность стволов. по сравнению со всеми остальными вариантами густоты подростa.

Для густого, средней густоты и редкого подростa определена тенденция возрастания величины  $\lambda_{0,1}$  стволов, как в коре, так и без коры, с уменьшением густоты подростa.

6. Снижение густоты подростa сопровождается существенным возрастанием содержания коры у стволов деревьев. У деревьев сосны в очень густом подросте содержание коры составляет примерно

1/12 от общего объема ствола в коре. В свою очередь, у отдельно стоящих деревьев (категория – подрост практически отсутствует) кора достигает почти 1/3 от общего объема ствола в коре.

7. Установлено, что независимо от густоты подроста, величина базисной плотности древесины

постепенно и плавно уменьшается от основания к верхней части ствола дерева. Абсолютные показатели величины базисной плотности древесины, для всех категорий густоты подроста, были практически одинаковым.

### Список литературы

1. Дубенок Н. Н., Кузьмичев В. В., Лебедев А. В. Рост и продуктивность сосново-липовых культур в Лесной опытной даче Тимирязевской академии // Лесохозяйственная информация. 2021. № 1. С. 40-48. *Библиогр.:* с. 46-47 (17 назв.). DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.1.03>.
2. Ilintsev A., Soldatova D., Bogdanov A., Koptev S., Tretyakov S. Growth and structure of pre-mature stands of Scots pine created by direct seeding in the boreal zone // Journal of Forest Science. 2021 (1). 67: 21-35. DOI: <https://doi.org/10.17221/70/2020-JFS>.
3. Санникова Н. С., Санников С. Н., Кочубей А. А., Петрова И. В. Естественное возобновление сосны на гарях в лесостепи Западной Сибири // Сибирский лесной журнал. – 2019. – № 5. – С. 22-29. – *Библиогр. С. 28-29 (16 назв.)*.
4. Древесная растительность на вырубках Тюменского Севера / К. Н. Башегуров, С. В. Залесов, К. В. Мельникова [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – Ч. 1. – № 6-3 (108). – С. 63-77. – *Библиогр.:* С. 126-127 (15 назв.). – DOI: 10.2367/IRJ.2022.116.2.020.
5. Башегуров К. Н., Залесов С. В., Морозов А. Е., Попов А. С. Накопление подроста сосны обыкновенной на вырубках в подзоне северной тайги // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 2 (116). – С. 123-127. – *Библиогр.:* С. 126-127 (15 назв.). – DOI: 10.2367/IRJ.2022.116.2.020.
6. Sklodowski J. Two directions of regeneration of post-windthrow pine stands depend of composition of the undergrowth and the soil environment // Forest ecology and management. 2020. Vol. 461. DOI: 10.1016/j.foresco.2020.117950
7. Dlugosiewicz J., Zając S., Wysocka-Fijorek E. Evaluation of the natural and artificial regeneration of Scots pine *Pinus sylvestris* L. in the forest district Nowa Dęba // Forest Research Papers. – 2019. – Vol. 80(2): 105-106. DOI: 10.2478/frp-2019-0009.
8. Mostarin A., Barbeito I., Christer R., Nilsson U. Regeneration failure of Scots pine changes the species composition of young forests // Scandinavian Journal Of forest research, 2021, Vol. 37, Iss. 1, pp. 14-22. DOI: 10.1080/02827581.2021.2005133.
9. Данчева А. А., Залесов С. В., Лучкина Н. В., Коровина В. С. Естественное возобновление сосны в городских лесах города Тюмени (на примере экопарка «Затюменский») // Природообустройство. – 2021. – № 4. – С. 124-131. *Библиогр.:* С. 131 (12 назв.). - DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-124-131.
10. Ермакова, М. В. Формирование структурно-функциональной организации молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) смешанного естественного-искусственного происхождения в условиях сосняков ягодникового Среднего Урала / М. В. Ермакова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 43-58. – *Библиогр.:* С. 126-127 (15 назв.). – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3.
11. Собачкин Д. С., Собачкин Р. С., Петренко А. Е. Особенности роста и продуктивности сосновых молодняков, сформированных из деревьев различного ценоотического статуса // Сибирский лесной журнал. – 2022. – № 3. – С. 34–39. – *Библиогр. С. 39 (8 назв.)*. DOI: 10.15372/SJF20220304.
12. Fomin V., Mikhailovich A., Zalesov S., Terehov G. Development of ideas within the framework of the genetic approach to the classification of forest types // Baltic Forestry. 2021; 27(1): 466. DOI: 10.46490/BF466.

13. Методика полевых работ по таксации леса на постоянных пробных площадях в рамках реализации инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг». Консорциум № 4. Версия 1.0. М.: - 2023. – 32 с.
14. Гаврилова, О. И. Оценка успешности самовозобновления сосны на гари / О. И. Гаврилова, Е. С. Колганов, К. А. Пак // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10. – № 4 (40). – С. 141–149. – Библиогр.: 147–149 (16 назв.). DOI: 10.34220/issn.2222-79621/2020.4/11.
15. Демаков Ю. П., Нуреева Т. В. Закономерности изменения рангового положения деревьев по их размерам в ценопопуляциях сосны обыкновенной // Лесоведение. – 2019. – № 4. – С. 274–285. – Библиогр.: 284–285 (53 назв.). DOI: 10.1134/S0024114819030021.
16. Карасева М. В., Мухортов Д. И., Лежнин К. Т. Изменчивость показателей роста семенного потомства сосны кедровой сибирской местной репродукции в Марийском Заволжье // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2023. – № 1 (57). – С. 73–87. – Библиогр.: 83–84 (23 назв.). – DOI: 10.25686/2306-2827.2023.1.73.
17. Shu Y. Zh., Haiqing R., Zehui J. Wood density and wood shrinkage in relation to initial spacing and tree growth in black spruce (*Picea mariana*) // Journal of wood science. 2021: 67-30. DOI: 10.1186/s10086-021-01965-9.
18. Усманов, Р. Р. Статистическая обработка данных агрономических исследований в программе «STATISTICA»: учеб.-метод. пособие / Р. Р. Усманов; РГАУ-МСХА. – Москва, 2020. – 177 с. – Библиогр.: 175–176 (17 назв.). DOI: 10/34677/2020.004.
19. Seed dispersal models for natural regeneration: A review and prospects / L. Moonil, L. Seonhu, L. Songhee, Yi. Koong [et al.] // Forests, 2022, 13(5): 659. DOI: 10.3390/f3050659.
20. Салтыков, А. И. Всплески естественного возобновления сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и сосны крымской (*Pinus pallasiana* D. Don): синхронность и общие закономерности / А. И. Салтыков // Экосистемы. – 2021. – Вып. 27. – С. 23–35. – Библиогр.: с. 34 (27 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.37279/2914-4738-2021-27-23-35>.
21. Astrat Z., Eid T., Gobbaken T., Negas M. Modelling and quantifying tree biometric prosperities of dry Afromontane forests of south-central Ethiopia // Trees. – 2020. – Vol. 34. – P. 1411–1426. – DOI: 10.1007/s00468-020-02012-8.
22. Данилов Д. А., Шестаков В. А., Шестакова Т. А., Эндерс О. О. Сукцессионные стадии восстановления древесной растительности на постагрогенных землях Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 233. С. 60–80. Библиогр.: 74-77 (25 назв.). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.60-80.
23. Изменение густоты и видового состава подроста при разном удалении от «стен» леса на постагрогенных площадях / Д. А. Феклистов, М. В. Аверина, И. Н. Болотов [и др.] // Лесной журнал. – 2020. – № 1 (373). – С. 88–98. – Библиогр.: 95–97 (34 назв.). DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-88-98.
24. Гаврилова О. И., Грязькин А. В. Особенности самовозобновления сосны на гари // Лесной вестник. Forestry bulletin. – 2022. – Т. 26. – № 3. – С. 69–74. – Библиогр. 70–72 (26 назв.). DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-69-74.

### References

1. Plintsev A., Soldatova D., Bogdanov A., Koptev S., Tretyakov S. Growth and structure of pre-mature stands of Scots pine created by direct seeding in the boreal zone. Journal of Forest Science. 2021 (1). 67: 21-35. DOI: <https://doi.org/10.17221/70/2020-JFS>.
2. Dubenok N. N., Kuz'michev V. V., Lebedev A. V. *Rost i produktivnost' sosnovo-lipovykh kul'tur v Lesnoy opytnoy dache Timiryazevskoy akademii* [Growth and productivity of pine-linden crops in the Forest Experimental Dacha of the Timiryazev Academy] // Lesokhozyaystvennaya informatsiya [Forestry information]. 2021. № 1. pp. 40-48. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2021.1.03 (In Russian).

3. Sannikova N. S., Sannikov S. N., Kochubei A. A., Petrova I. V. Estestvennoe vozobnovlenie sosny na garyah v lesostepi Zapadnoj Sibiri [Natural pine regeneration on burns in forest-steppe of Western Siberia] // Sibirskij lesnoj zhurnal [Siberian Forest Journal]. 2019. 5. pp. 22-29. DOI: 10.15372/SJFS20190503 (In Russian).

4. Bashegurov K. A., Zalesov S. V., Melnikova K. V. et al. Drevesnaya rastitel'nost' na vyрубkah Tyumenskogo Severa [Woody vegetation on the west Siberian north taiga lowland forest region // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Scientific Research Journal]. 2021. Iss. 3. 6-3(108). pp. 63-67. DOI: 10.2367/IRJ.2021.108.6.070 (In Russian).

5. Bashegurov K. A., Zalesov S. V., Morozov A. E., Popov A. S. Nakoplenie podrosta sosny obyknovЕННОj na vyрубkah v podzone severnoj tajgi [Accumulation of Scots pine undergrowth on cuttings in the subzone of the northern taiga] // [Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal International Scientific Research Journal]. 2022. № 2 (116). pp. 123-127. DOI: 10.2367/IRJ.2022.116.2.020 (In Russian).

6. Sklodowski J. Two directions of regeneration of post-windthrow pine stands depend of composition of the undergrowth and the soil environment // Forest ecology and management. - 2020. – Vol. 461. DOI: 10.1016/j.foresc.2020.117950.

7. Długosiewicz J., Zając S., Wysocka-Fijorek E. Evaluation of the natural and artificial regeneration of Scots pine *Pinus sylvestris* L. in the forest district Nowa Dęba. Forest Research Papers, 2019, Vol. 80(2): 105-106. DOI: 10.2478/frp-2019-0009.

8. Mostarin A., Barbeito I., Christer R., Nilsson U. Regeneration failure of Scots pine changes the species composition of young forests. Scandinavian Journal Of forest research, 2021, Vol. 37, Iss. 1, pp. 14-22. DOI: 10.1080/02827581.2021.2005133.

9. Dancheva A. V., Zalesov S. V., Luchkina N. V., Korovina V. S. Estestvennoe vozobnovlenie sosny v gorodskih lesah goroda Tyumeni (na primere ekoparka «Zatyumenskij» [Natural renewal of pine in the urban forests of the city of Tyumen (on the example of the «Zatyumensky» Ecopark)]. Prirodoobustrojstvo [Environmental Engineering]. 2022. № 4. pp. 124-131. DOI:10.26897/1997-6011-2022-4-124-131 (In Russian).

10. Ermakova M. V. Formirovanie strukturno-funkcional'noj organizacii molodnyakov sosny obyknovЕННОj (*Pinus sylvestris* L.) smeshannogo estestvennogo-iskusstvennogo proiskhozhdeniya v usloviyah sosnyakov yagodnikovogo Srednego Urala [Formation of the structural and functional organization of young stands of scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) of mixed artificial and natural origin in the condition of berry pine forests of and forb pine forests of the Middle Urals // Lesotekhnicheskij zhurnal [Forestry Engineering Journal]. 2023. Vol. 2. № 2(50). pp. 43-58. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3 (In Russian).

11. Sobachkin D. S., Sobachkin R. S., Petrenko A. E. Osobennosti rosta i produktivnosti sosnykh molodnyakov, sformirovannykh iz derev'ev raznogo cenoticheskogo statusa [The specifics of growth and productivity of young pine stands, formed of the trees of different cenotic position]. Sibirskij lesnoj zhurnal [Siberian Forest Journal]. 2022. № 3. pp. 34-39. DOI: 10.15372/2/SJFS202203045 (In Russian).

12. Fomin V., Mikhailovich A., Zalesov S., Terehov G. Development of ideas within the framework of the genetic approach to the classification of forest types. Baltic Forestry. 2021. Vol. 27. Iss. 1. pp. 466. DOI: 10.46490/BF466.

13. Metodika polevykh rabot po taksacii lesa na postoyannykh probnykh ploshchadyah v ramkah realizacii innovacionnogo proekta gosudarstvennogo znacheniya «Uglerod v ekosistemah: monitoring». Konsorcium № 4. Versiya 1.0. [Methodology for field work on forest taxation on permanent trial plots as part of the implementation of an innovative project of national importance “Carbon in ecosystems: monitoring.” Consortium No. 4. Version 1.0.] Moskow. 2023. 32 p. (In Russian).

14. Gavrilova O. I., Kolganov E. S., Pak K. A. Ocenka uspešnosti samovozobnovleniya sosny na gari [Evaluation of success of pine self-renewal forests on burnt-out areas]. Lesotekhnicheskij zhurnal [Forestry Engineering Journal]. 2020. Vol. 10. 4(40). pp. 142-149. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.4/11 (In Russian).

15. Demakov Yu. P., Nureeva T. V. *Zakonomernosti izmeneniya rangovogo polozheniya derevyev po ix razmeram v cenopopulyatsiyax sosny obyknovnoy* [Features of evolution of a tree size rank in coenopopulations of Scots pine // Lesovedenie [Forestry]. 2019. № 4: pp. 274-285. DOI: 10.1134/S0024114819030021 (In Russian).

16. Karaseva M. V., Muhortov D. I., Lezhnin K. T. *Izmenchivost' pokazatelej rosta semennogo potomstva sosny kedrovoj sibirskoj mestnoj reprodukcii v Marijskom Zavolzh'e* [Variability of growth indices of Siberian pine seed progeny of local reproduction in Mari-Trans-Volga region]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie» [Vestnik of Volga State University of Technology. Seria: Forest. Ecology. Nature management. 2023. № 1(57). pp. 73-87. DOI: 10.25686/2306-2827.2023.1.73 (In Russian).

17. Shu Y. Zh., Haiqing R., Zehui J. Wood density and wood shrinkage in relation to initial spacing and tree growth in black spruce (*Picea mariana*). Journal of wood science. 2021: 67-30. DOI: 10.1186/s10086-021-01965-9

18. Usmanov R. R. *Statisticheskaya obrabotka dannyh agronomicheskikh issledovanij v programme «STATISTICA» Uchebno-metodicheskoe posobie* [Statistical processing of agronomic research data in the program «STATISTICA» Teaching aid]. RGAU-MSHA. Moscow, 2020. 177 p. DOI: 10/34677/2020.004.

19. Moonil L., Seonghu L., Songhee L., Koong Yi. [et al.]. Seed dispersal models for natural regeneration: A review and prospects. Forests, 2022, 13(5): 659. DOI: 10.3390/f3050659.

20. Saltykov A. I. *Vsplek estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovnoy (Pinus sylvestris L.) i sosny krymskoj (Pinus pallasiana D. Don): sinhronnost' i obshchaya zakonomernost'* [Surges of natural recovery of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Crimean pine (*Pinus pallasiana* D. Don): synchronicity and general patterns]. *Ekosistemy* [Ecosystems]. 2021, Iss. 27: pp. 23-35. (In Russian).

21. Astrat Z., Eid T., Gobbaken T., Negas M. Modelling and quantifying tree biometric prosperities of dry Afromontane forests of south-central Ethiopia. Trees. 2020. Vol. 34. pp. 1411-1426. DOI: 10.1007/s00468-020-02012-8.

22. Danilov D. A., Shestakov V. A., Shestakova T. A., Enders O. O. *Sukcessionnye stadii vosstanovleniya drevesnoj rastitel'nosti na postagrogennykh zemlyah Leningradskoj oblasti* [Successional stages of restoration of woody vegetation on postagrogenic lands of the Leningrad region]. Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii [News of the St. Petersburg Forestry Academy], 2020, is. 233, pp. 60–80. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.60-80 (in Russian).

23. Feklistov D. A., Averina M. V., Bolotov I. N. et al. *Izmenenie gustoty i vidovogo sostava podrosta pri raznom udaleni ot «sten» lesa na postagrogennykh ploshchadyah* [Changes in density and species composition of undergrowth at different distances from the forest edges in postagrogenic areas]. Lesnoy zhurnal [Forest journal]. 2020. № 1(373). pp. 88-98. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-88-98 (in Russian).

24. Gavrilova O. I., Gryaz'kin A. V. *Osobennosti samovozobnovleniya sosny na gari* [Pine self-regeneration in burnt forest area] // Lesnoj vestnik [Forestry bulletin]. 2022, Iss. 26, № 3, pp. 69-74. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-69-74 (In Russian).

### Сведения об авторе

✉ *Ермакова Мария Викторовна* – доктор с.-х. наук, вед. научный сотрудник, ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН», ул. 8 Марта, 202а, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9894-6587>, e-mail: M58\_07E@mail.ru.

### Information about the author

*Maria V. Ermakova* – Dr. Sci. (Agric.), Leading researcher of Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, 202a, 8 Marta str., Ekaterinburg, 620144, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9894-6587>, e-mail: M58\_07E@mail.ru

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4>

УДК (630\*232.312.3 + 630\*232.323.7) : 630\*232.32



## Динамика роста хвойных древостоев *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. и *Pinus sibirica* Du Tour: модифицированная модель

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

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>

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

Модификация модели динамики хода роста общей биомассы древостоев сфокусирована на использовании возраста физиологической зрелости (спелости), который, как показывают предыдущие расчеты, является константой для каждого вида: *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. и *Pinus sibirica* Du Tour. Валидация модифицированной модели проводилась для хвойных древостоев – еловых, сосновых и кедровых, родственных в биологическом отношении. Для древостоев *P. sylvestris*, *P. abies* и *P. sibirica* аллометрический параметр, характеризующий связь биомассы с площадью насаждения, не зависит от класса бонитета и является константой для каждого вида. Поведение параметра, который характеризует скорость расхода ресурса, индивидуально для каждого вида. Для древостоев *P. abies* этот параметр возрастает, а для *P. sylvestris* убывает с ростом бонитета, для древостоев *P. sibirica* эта зависимость оказывается нелинейной. В будущем данное обстоятельство нуждается в дополнительном исследовании. Статистический критерий Нэша-Сатклиффа показал высокую точность (для древостоев второго бонитета NSE = 0.9987 для *P. sylvestris*, NSE = 0.9828 для *P. abies* и NSE = 0.9781 для *P. sibirica*) модифицированной модели. По сравнению с аналогичными моделями, не учитывающими возраст физиологической зрелости, качество модифицированной модели возросло на порядок. Для всех видов древостоев дополнительно рассчитывалось относительное отклонение расчета от эмпирических данных, которое в целом составило 1-2 %, за исключением возрастов, меньших по сравнению с физиологическим возрастом зрелости. Для этих возрастов относительное отклонение повышалось до 5 %, что связано, по мнению авторов, с процессами становления хвойного насаждения как экологической системы.

**Ключевые слова:** модель динамики древостоев, сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L., ель европейская, *Picea abies* L., сосна кедровая сибирская, *Pinus sibirica* Du Tour, сосновые древостои, еловые древостои, кедровые древостои

**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:** Лисицын, В. И. Динамика роста хвойных древостоев *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. и *Pinus sibirica* Du Tour: модифицированная модель / В. И. Лисицын, Т. П. Новикова, А. И. Новиков // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 54–69. – Библиогр.: с. 64–68 (35 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4>.


Поступила 11.04.2024. Пересмотрена 23.05.2024. Принята 23.05.2024. Опубликована онлайн 17.06.2024.

Article

## Growth dynamics of *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. and *Pinus sibirica* Du Tour coniferous stands: modified model

Victor I. Lisitsyn ✉, lisicyn-viktor@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

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>

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

### Abstract

Modification of the growth dynamics model of the total biomass of forest stands is focused on using the age of physiological maturity (ripeness), which, as shown by previous calculations, is a constant for each species: *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. and *Pinus sibirica* Du Tour. Validation of the modified model was carried out for coniferous stands – spruce, pine and cedar, biologically related. For stands of *P. sylvestris*, *P. abies* and *P. sibirica* is an allometric parameter that characterizes the relationship of biomass with the area of planting, does not depend on the class of bonus and is a constant for each species. The behavior of the parameter that characterizes the rate of resource consumption is individual for each type. For stands of *P. abies*, this parameter increases, and for *P. sylvestris* decreases with increasing bonus, for stands of *P. sibirica*, this dependence turns out to be nonlinear. In the future, this circumstance needs additional research. The statistical Nash-Sutcliffe criterion showed high accuracy (by coniferous stands of the second site class NSE = 0.9987 for *P. sylvestris*, NSE = 0.9828 for *P. abies* and NSE = 0.9781 for *P. sibirica*) of the modified model. Compared with similar calculations that do not take into account the age of physiological maturity, the quality of the modified model has increased by an order of magnitude. For all types of coniferous stands, the relative deviation of the calculation from empirical data was additionally calculated, which in general amounted to 1-2%, with the exception of ages lower than the physiological age of maturity. For these ages, the relative deviation increased to 5%, which, according to the authors, is associated with the processes of formation of coniferous plantations as an ecological system.

**Keywords:** model of the stand's dynamics, Scots pine, *Pinus sylvestris* L., European spruce, *Picea abies* L., Siberian pine, *Pinus sibirica* Du Tour, pine stands, spruce stands, cedar stands

**Funding:** the study was funded by the Russian Science Foundation grant No. 23-26-00102, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/>.

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

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

**For citation:** Lisitsyn V. I., Novikova T. P., Novikov A. I. (2024). Growth dynamics of *Pinus sylvestris* L., *Picea abies* (L.) H.Karst. and *Pinus sibirica* Du Tour coniferous stands: modified model. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 54-69 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/4>.

**Received** 11.04.2024. **Revised** 23.05.2024. **Accepted** 23.05.2024. **Published online** 17.06.2024.

### Введение

Ключевая роль лесов в балансе углерода во всем мире не подлежит сомнению. Леса, как представляют W.V. Reid и H.A. Mooney (2018) [1],

N.L. Harris et al (2021) [2], являются местом обитания подавляющего большинства наземного биоразнообразия. Смещение энергетического баланса Земли увеличением лесного покрова (биомассы) при

снижении лесных площадей, что следует из данных Х.-P. Song и др. (2018) [3], значительно усиливается в течение последних нескольких десятилетий. Принятие Киотского протокола в 1997 году подчеркнуло роль лесов в регулировании климата, что безусловно признано научным сообществом во всем мире. Поэтому управление качеством адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR), как это показано у А.И. Novikov и др. (2019), Т.Р. Novikova и др. (2021, 2022, 2023), разработкой FLR-алгоритмов [4-6] справочной информационной системы FLR-Library [7-9] с целью дальнейшего увеличения углерода, хранящегося в биомассе деревьев, имеет решающее значение для поддержания мониторинга и прогнозирования роли лесов в смягчении климата. Мониторинг лесной биомассы и накопления углерода опирается на источники данных, ориентированные на уровень древостоев, что дает возможность получать точные оценки надземной биомассы в десятилетнем масштабе при наличии систематических лесных кадастров. В частности, динамические модели роста древостоев прогнозируют рост леса во времени, что позволяет оценить его запасы за период ротации. Основная идея состоит в том, чтобы сформулировать такой закон роста, который хорошо соответствует реальной структуре древостоя и его можно использовать так, чтобы характеристики древостоя изменялись во времени в зависимости от ключевых факторов, таких как условия окружающей среды.

Рост и плодоношение деревьев могут определяться качеством посевного [34] и посадочного [35] материала, размерами и геометрией дерева, конкуренцией соседей и альтитудой произрастания у D.A. Coomes и R.B. Allen (2007)<sup>2</sup>, N. Yazici et al. (2023) [10]; доступностью ресурсов и условиями окружающей среды у L. Marqués (2021) [11]. Эмпирические (в самом широком смысле этого слова) модели роста древостоев интерпретируют эффекты ассимиляции углерода и реакции на изменение ресурсов и условий окружающей среды путем явного описания изменчивости ресурсов – например, доступности света и почвенной воды у К.Е.А. Wood (2023)

[12], или через эффекты зависимости от биомассы у Т.С. Kohyama (2019) [13], или комбинации этих эффектов у В. Roitberg и др. (2024) [14].

Существует широкий набор динамических моделей, от «регрессивных» до эколого-физиологических (ЭФМ), разработанных и уточненных ранее В.И. Лисицыным и др. (2021, 2022) [15-17], которые применяются для достижения вышеуказанных целей. В последнее время наблюдается рост количества данных о реакции лесов на изменение климата, расширяется спектр моделей лесов, использующих различные методологические подходы. С нашей точки зрения, перспективными являются модели, которые базируются на термодинамике неравновесных процессов в открытых системах. Современный взгляд на применение законов термодинамики в экологии развит в работе S. Nielsen и др. (2020) [18], где показано, что законы термодинамики «работают» в экологии, в том числе и в экологии леса.

Проблема моделирования хвойных древостоев в настоящее время весьма актуальна и ей посвящено достаточно много работ. В специальном выпуске E. Harold (2021) [19] представлены материалы по всем аспектам моделирования роста и урожайности лесов, включая сбор и анализ данных, подходы к моделированию, а также валидации и реализации моделей. Следует отметить работы Н.Н. Дубенок и др. (2023) [20] и Т.В. Stankova (2016) [21], в которых моделируется рост древостоев *P. sylvestris*, а также работы P.V. Mikhaylov (2021) [22], где рассматриваются современные проблемы моделирования еловых древостоев в канадских и европейских лесах, в том числе изучаются вопросы российских еловых древостоев. В работах Р.Н. Матвеевой и др. (2020) [23], Р.Н. Матвеевой и др. (2023) [24], С.В. Левина (2022) [25] обращено внимание на проблему выращивания *P. sibirica*, которая характеризуется качественным и достаточно ранним плодоношением.

В вышеуказанных работах, как правило, представлено «регрессивное» направление моделирования, необходимость использования которого

<sup>2</sup> Coomes D.A., Allen R.B. Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology*. 2007; 95 (5): 1084-1097. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01280.x>.



для практического лесоводства не вызывает сомнений. Однако во многих вопросах, связанных с проблемами прогнозирования роста древостоев, управлением лесов, роль ЭФМ для оценки динамики роста древостоев занимает достаточно высокое место, так как параметры этих моделей имеют ясный эколого-физиологический смысл. Причем, что важно отметить, в структурно-динамическом моделировании изменение этих параметров позволяет реагировать на многие внешние факторы, значительно изменяющие развитие древостоев.

Ранее при участии первого автора разработана ЭФМ [16, 17], где в качестве отправной точки лежит положение о достижении в процессе роста древостоя стационарного режима, который с термодинамической точки зрения характеризуется балансом энтропии и энергии. Начало стационарного режима соответствует времени  $t_{st}$ , при котором биомасса древостоя достигает максимального значения. Эта ЭФМ применялась для расчета динамики роста полных (нормальных) древостоев *P. sylvestris* [16], *Q. robur* [26], *P. sibirica* [27]. В них показано, что точность модели достигает достаточно высоких статистических показателей

В работах В.И. Лисицына и Т.П. Новиковой (2023) [27], В.И. Лисицына и др. (2023) [28] указано на важность использования при моделировании констант (интегральных величин), которые позволяют разрабатывать адекватные действительности модели древостоев. Одной из целей настоящей работы является следующее предложение - в качестве такой константы использовать время достижения физиологической зрелости (спелости), способы нахождения которого рассматриваются в работах [28, 29]. Такая модификация метода позволит значительно улучшить статистические показатели точности воспроизводимых результатов, и, что особенно важно, ввести ЭФМ константу, характеризующую начало функционирования древостоя как системного продукта. Это предположение, безусловно, требует дальнейшего изучения с точки зрения законов «экологической» термодинамики.

Цель работы – исследовать эффективность модифицированной ЭФМ для расчета еловых (*Picea abies* (L.) H.Karst.), сосновых (*Pinus sylvestris* L.) и кедровых (*Pinus sibirica* Du Tour) древостоев в сравнении с ЭФМ, не учитывающей возраст биологической зрелости древостоев.

## Материалы и методы

### Объект и предмет исследования

Объект: полные древостои: 1) *P. sylvestris*; 2) *P. abies*; 3) *P. sibirica*.

Предмет: набор табличных значений вариант общей продуктивности биомассы и числа деревьев на гектар в древостоях указанных видов, извлеченный из моделей хода роста А.З. Швиденко и др. (2008) [30].

### Теоретические предпосылки

Теоретической базой данного исследования является ЭФМ [15,16], в которой на основе аналитического решения системы дифференциальных уравнений были получены функции, описывающие ход роста древостоев в зависимости от времени, причем для биомассы отдельного дерева было использовано известное уравнение Людвиг фон Берталанффи<sup>3</sup> (1958).

$$\frac{dm}{dt} = fgm^q - rm . \quad (1)$$

Уравнение (1), как известно, является следствием применения закона сохранения энергии в биологических процессах (баланс энергии). Ранее было показано [15], что в процессе роста древостой термодинамически достигает стационарного режима. В это время наблюдается баланс энтропии. С момента наступления стационарного режима общая биомасса насаждения достигает максимального значения. Исходя из этого положения, в [15] выведено новое дифференциальное уравнение, определяющее зависимость числа деревьев на гектар от времени. В результате получена система связанных дифференциальных уравнений, которая имеет аналитическое решение при заданных начальных условиях. Для решения системы дифференциальных уравнение требуется задать эти начальные условия. Значения для начальных условий выбираются из

<sup>3</sup> Von Bertalanffy, L. Quantitative Laws in Metabolism and Growth. Q. Rev. Biol. 1957, 32, 217–231. DOI: <https://doi.org/10.1086/401873>.

Таблиц биологической продуктивности (общей продуктивности биомассы) и Таблиц хода роста (числа деревьев на гектар) при минимальном времени, приведенном в этих таблицах. Обычно это время ограничено 10-20 годами.

В отличие от работ [23, 24], где начальное время  $t_0$ , как уже сказано выше, определяется из таблиц хода роста как минимальное значение по времени в этих таблицах, в настоящей работе в качестве начальных значений  $m_0$  и  $N_0$  выбираем значения этих величин при  $t_0 = t_{сп.}$ , где  $t_{сп.}$  - время физиологической спелости, которое находится по методу, разработанному в [25, 26], причем значения и средней биомассы отдельного дерева, и числа деревьев на гектар для  $0 < t < t_0$ , т.е. для возрастов меньше времени физиологической спелости, рассчитываются из соответствующих уравнений для  $m(t)$  и  $N(t)$ .

Вид уравнений для  $m(t)$  и  $N(t)$  дается в [15], расчет динамики роста по которым требует знания четырех параметров модели: биомассы единичного дерева  $m_\infty$  и количества таких деревьев  $N_\infty$  на единицу площади (например, га) для максимального момента времени, скорости расхода ресурса  $r$ , аллометрического коэффициента  $q$ .

#### Сбор данных

Для создания модифицированной ЭФМ использовали наборы данных [30], обозначенных как предмет исследования, для:

1) полного (нормального) соснового древостоя *P. sylvestris* – стр. 384 и стр. 81 соответственно в работе [30];

2) елового древостоя *P. abies* в экорегионах южной тайги северной подзоны смешанных лесов – стр.509 и стр.185 соответственно в работе [30];

3) кедрового древостоя *P. sibirica* на Юго-западном макросклоне Горного Алтая – стр. 606 и стр. 271 соответственно в работе [30].

#### Анализ данных

Расчеты проводили в соответствии с программой расчета динамики роста древостоев по эколого-физиологической модели, основанной на термодинамическом подходе [31]. Программа создана в

среде RTC Mathcad Prime 4.0, причем она может быть реализована и в более ранних версиях Mathcad-a. В программе определяли параметры модели и производили расчет значений:

- биомассы  $m$  отдельного дерева, т;
- числа деревьев  $N$  на гектар, шт. га<sup>-1</sup>;
- общей биомассы  $M$  насаждения, т.

Отдельный блок программы рассчитывал возраст физиологической спелости по методу, предложенному в [27, 28].

Для определения статистической значимости результатов предусмотрены следующие блоки:

– в таблицах общей продуктивности не всегда сохраняется промежуток времени между данными в 10 лет, поэтому недостающие значения определяли с помощью линейной экстраполяции, если этот промежуток равнялся 20 годам. Линейная экстраполяция давала ошибку в данных, не превосходящую 0,5%. Проверку осуществляли на таблицах данных с временным шагом в 10 лет;

– качество модели оценивали статистическим критерием эффективности Нэша-Сатклифа<sup>4</sup>  $NSE$  [32], согласно которому рассчитывали значение критерия по формуле:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^K (Y_i^{emp} - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^K (Y_i^{emp} - Y_{mean})^2}, \quad (2)$$

где  $Y_i^{emp}$  – эмпирические данные для конкретной величины из таблиц;  $Y_i$  – расчетные данные по модели для тех же моментов времени;  $Y_{mean}$  – среднее (медианное) значение той же величины. Значение  $NSE$  может находиться в интервале  $(-\infty, 1)$ , где 1 соответствует идеальному описанию данных моделью, 0 – качеству описания, совпадающему с описанием эмпирическим средним (медианным) значением,  $ME < 0$  – свидетельствует о непригодности используемой модели.

– в программе рассчитывались среднеквадратичное отклонение по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (Y_i^{emp} - Y_i)^2}{K-1}} \quad (3)$$

– для каждого рассчитанного по модели значения определялась относительная ошибка

<sup>4</sup> Nash J E and Sutcliffe J V 1970 River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. J. Hydrology 10(3) 282 [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

$$\varepsilon_i = \frac{|Y_i^{emp} - Y_i|}{Y_i^{emp}} \quad (4)$$

Расчеты биомассы отдельного дерева, числа деревьев на гектар проводили для всех классов бонитета хвойных древостоев, которые даны в таблицах А.З. Швиденко и др. [30].

**Результаты**

В табл. 1-4 приведены значения следующих параметров ЭФМ:  $t_{sp}$  – возраст физиологической спелости в годах,  $m_0$  – биомасса отдельного дерева в тоннах, полученная делением общей биомассы древостоя  $M_0$  на число деревьев на гектар  $N_0$  (соответствующие значения взяты из указанных таблиц

для возрастов, равных  $t_{sp}$ ),  $m_{\infty}$ ,  $N_{\infty}$ ,  $r$ ,  $q$  - параметры модели, определенные по результатам оптимизации  $g_j$  критерию эффективности Нэша-Сатклифа  $ME$ . Для всех видов древостоя и для всех бонитетов рассчитывались среднееквадратичное отклонение и относительная ошибка по формулам (3) и (4). Отношение среднееквадратичного отклонения к соответствующему медианному значению величин составляло не более 0,005. Относительная ошибка для промежутков времени  $t_{sp} < t < t_{max}$  не превышала 2 %. Для значений времени меньших, чем возраст физиологической спелости ошибка увеличивалась до 5 %.

Таблица 1

Исследование модифицированной ЭФМ роста древостоев *Picea abies* (L.) H.Karst. по уровням бонитета

Table 1

A study of the modified EFM of the growth of *P. abies* stands by forest site class

Бонитет  Site class	$t_{cn}$ (лет)  $t_{sp}$ (years)	$m_0$ (тонн)  $m_0$ (tonnes)	$N_0$ 1/га  $N_0$ 1/ha	$m_{\infty}$ , (тонн)  $m_{\infty}$ (tonnes)	$N_{\infty}$ 1/га  $N_{\infty}$ 1/ha	$r$	$t_{max}$ (лет)  $t_{max}$ (years)	Критерий эффективности Нэша-Сатклифа $NSE$		
								$m$	$N$	$M$
1	0	0.1468	1183	1.70	230	0.046	200	0.9999	0.9969	0.9914
2	50	0.083658	1591	1.08	310	0.048	190	0.9995	0.9981	0.9828
3	50	0.054987	1975	0.690	370	0.05	180	0.9998	0.9999	0.9971
4	50	0.036893	2369	0.400	450	0.052	160	0.9995	0.9998	0.9993
5	50	0.021759	3070	0.188	625	0.0555	150	0.9973	0.999	0.9969

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 2

Исследование модифицированной ЭФМ роста полных древостоев *P. sylvestris* по уровням бонитета

Table 2

A study of the modified EFM of the growth of *P. sylvestris* normal stands by forest site class

Бонитет  Site class	$t_{cn}$ (лет)  $t_{sp}$ (years)	$m_0$ (тонн)  $m_0$ (tonnes)	$N_0$ 1/га  $N_0$ 1/ha	$m_{\infty}$ , (тонн)  $m_{\infty}$ (tonnes)	$N_{\infty}$ 1/га  $N_{\infty}$ 1/ha	$r$	$t_{max}$ (лет)  $t_{max}$ (years)	Критерий эффективности Нэша-Сатклифа $NSE$		
								$m$	$N$	$M$
1б	50	0.348244	911	3.00	175	0.0523	140	0.9996	0.9997	0.9931
1а	50	0.247725	1055	2.35	190	0.051	160	0.9998	0.9987	0.9884
1	50	0.168356	1245	1.90	200	0.047	160	0.9991	0.9995	0.9940
2	50	0.109560	1506	1.40	240	0.044	160	0.9996	0.9989	0.9987
3	60	0.106629	1433	1.07	260	0.038	180	0.9981	0.9999	0.9934

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 3

Исследование модифицированной ЭФМ роста древостоев *Pinus sibirica* Du Tour по уровням бонитета

Table 3

A study of the modified EFM of the growth of *P. sibirica* stands by forest site class

Бонитет   Site class	$t_{cn}$ (лет)  $t_{sp}$ (years)	$m_0$ (тонн)  $m_0$ (tonnes)	$N_0$ 1/га  $N_0$ 1/ha	$m_{\infty}$ (тонн)  $m_{\infty}$ (tonnes)	$N_{\infty}$ 1/га  $N_{\infty}$ 1/ha	$r$	$t_{max}$ (лет)  $t_{max}$ (years)	Критерий эффективности Нэша-Сатклифа $ME$		
	$m$	$N$	$M$							
2	40	0.020277	3970	3.20	140	0.046	240	0.9990	0.9998	0.9781
3	40	0.01129	5341	1.95	192	0.044	240	0.9975	0.9916	0.9831
4	40	0.006321	6929	1.05	288	0.047	240	0.9970	0.9951	0.9742
5	40	0.003613	8110	0.60	370	0.049	240	0.9969	0.9993	0.9610

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Таблица 4

Исследование не учитывающей возраст физиологической зрелости ЭФМ роста полных древостоев *P. sylvestris* по уровням бонитета

Table 4

A study of the age-disregarding physiological maturity EFM of the full stand's growth of *P. sylvestris* by site class

Бонитет   Bonitet	$m_0$ (тонн)  $m_0$ (tonnes)	$N_0$ 1/га  $N_0$ 1/ha	$m_{\infty}$ (тонн)  $m_{\infty}$ (tonnes)	$N_{\infty}$ 1/га  $N_{\infty}$ 1/ha	$r$	$t_{max}$ (лет)  $t_{max}$ (years)	Критерий эффективности Нэша-Сатклифа $ME$		
	$m$	$N$	$M$						
1б	0.004204	8277	2.95	172	0.0523	140	0.9995	0.9948	0.9721
1а	0.002912	10061	2.35	187	0.051	160	0.9981	0.9967	0.9683
1	0.001886	12753	1.80	195	0.047	160	0.9986	0.9931	0.9640
2	0.001024	16753	1.40	222	0.044	160	0.9961	0.9958	0.9930
3	0.000568	23756	1.09	230	0.038	180	0.9971	0.9901	0.9536

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

Оптимизация проводилась для  $m(t)$  и  $N(t)$  как функций четырех независимых параметров модели -  $m_{\infty}$ ,  $N_{\infty}$ ,  $r$ ,  $q$ . Эти функции в зависимости от указанных параметров имеют локальные минимумы. Оптимизация проводилась как сказано выше по критерию эффективности Нэша-Сатклифа  $ME$  с учетом минимальности среднеквадратичного отклонения и относительной ошибки. Значения, полученные в результате оптимизации, приводятся в табл. 1-4, за исключением аллометрического параметра  $q$ , определяющего связь площади поверхности и биомассы особи, который составляет 0.7 как для елового древостоя, так и для соснового древостоя для всех бонитетов. Этот параметр для кедрового бонитета ра-

вен 0.74. Он также одинаков для всех бонитетов кедрового древостоя. В табл. 4 для сравнения даны те же значения, что и в табл. 2 для соснового древостоя, но без учета возраста физиологической спелости, т.е. немодифицированная модель.

На рисунках показаны зависимости величин  $m1(t)$ ,  $N1(t)$  и  $M1(t)$ , рассчитанные на основе модифицированной ЭФМ для трех исследуемых древостоев: *Pinus sylvestris* L. (рис. 1-3), *Picea abies* (L.) H.Karst. (рис. 4-6), *Pinus sibirica* Du Tour (рис. 7-9). На них приводятся, кроме того, соответствующие эмпирические значения  $m(t)$ ,  $N(t)$  и  $M(t)$  из таблиц А.3. Швиденко и др. [30], причем значение биомассы отдельного дерева  $m(t)$  дается в тоннах, числа деревьев на гектар  $N(t)$  – в 1/га и общая биомасса

древостоя  $M(t)$  в т/га. Для наглядности и репрезентативности выбраны разные классы бонитета.

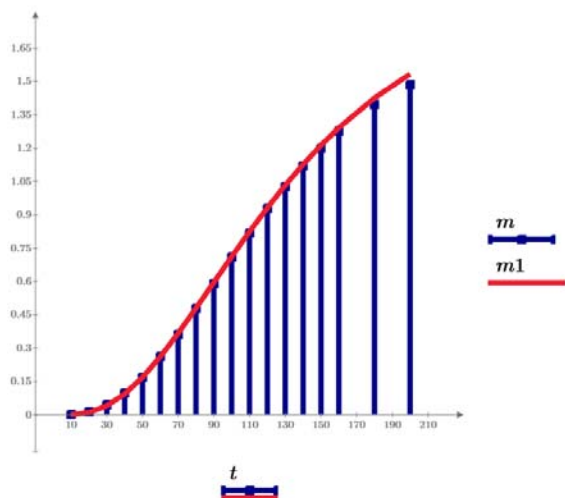


Рисунок 1. Зависимость биомассы отдельного дерева от времени для древостоя *P. sylvestris* (1 класс бонитета)

Figure 1. Dependence of individual tree biomass on time for a *P. sylvestris* stand (site class I)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

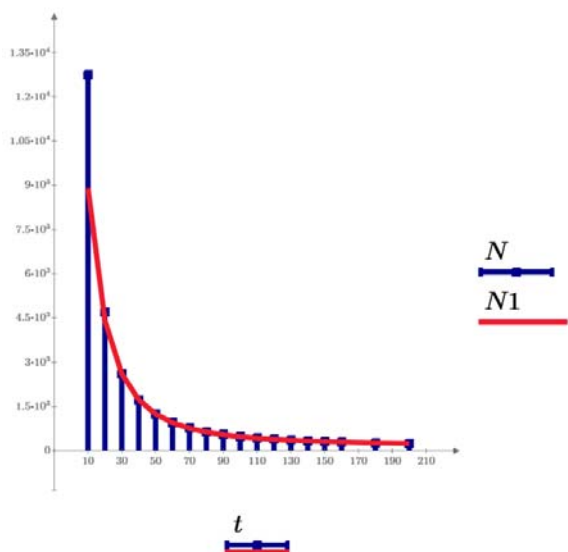


Рисунок 2. Зависимость числа деревьев на гектар  $N(t)$  от времени для древостоя *P. sylvestris* (1 класс бонитета)

Figure 2. Dependence of the number of trees per hectare  $N(t)$  on time for a *P. sylvestris* stand (site class I)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

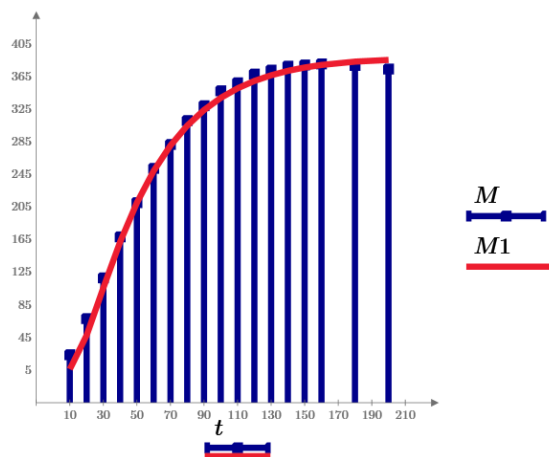


Рисунок 3. Зависимость общей биомассы древостоя на одном гектаре  $M(t)$  от времени древостоя *P. sylvestris* (1 класс бонитета)

Figure 3. Dependence of total stand biomass per hectare  $M(t)$  on time for a *P. sylvestris* stand (site class I)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

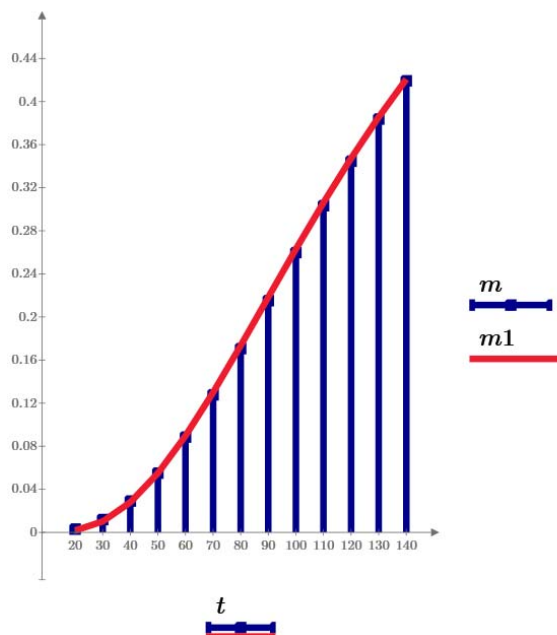


Рисунок 4. Зависимость биомассы отдельного дерева от времени для древостоя *P. abies* (3 класс бонитета)

Figure 4. Dependence of individual tree biomass on time for a *P. abies* stand (site class III)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

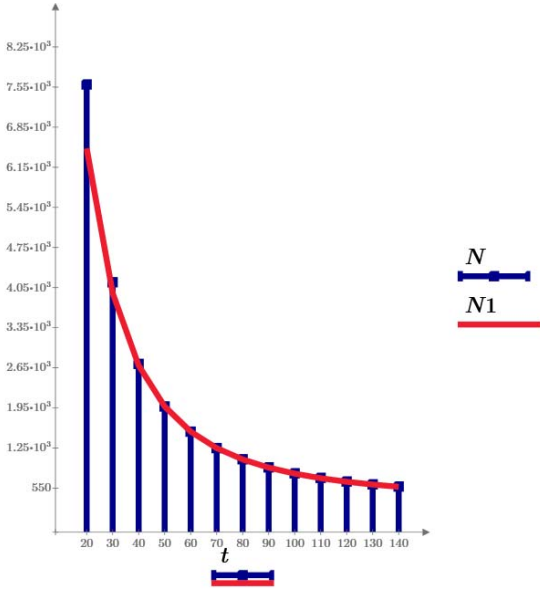


Рисунок 5. Зависимость числа деревьев на гектар  $N(t)$  от времени для древостоя *P. abies* (3 класс бонитета)

Figure 5. Dependence of the number of trees per hectare  $N(t)$  on time for a *P. abies* stand (site class III)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

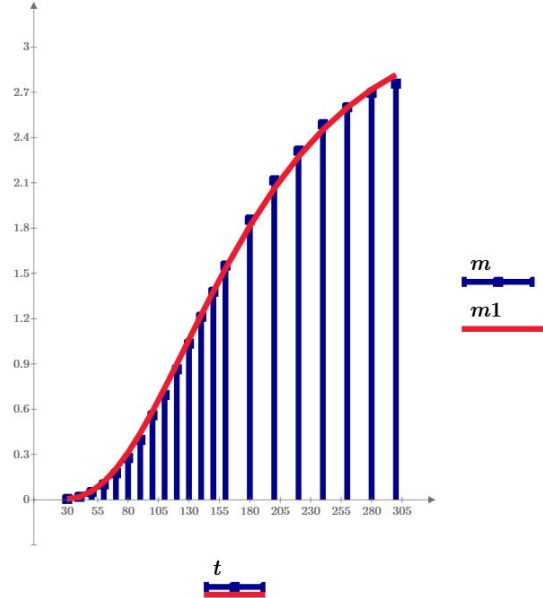


Рисунок 7. Зависимость биомассы отдельного дерева от времени для древостоя *P. sibirica* (2 класс бонитета)

Figure 7. Time dependence of individual tree biomass for a *P. sibirica* stand (site class II)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

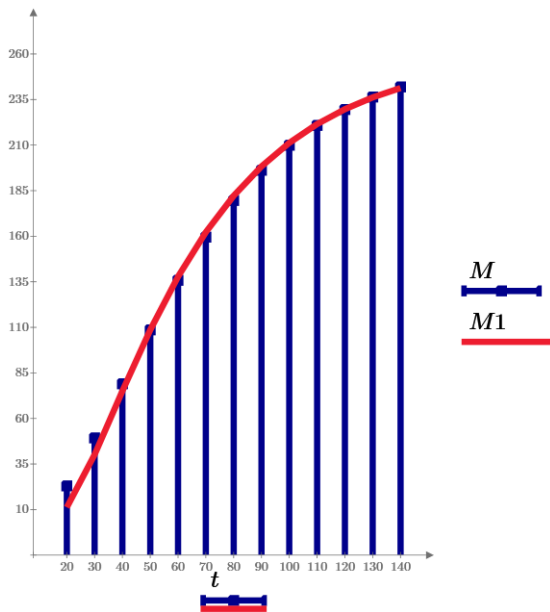


Рисунок 6. Зависимость общей биомассы древостоя на одном гектаре  $M(t)$  от времени для древостоя *P. abies* (3 класс бонитета)

Figure 6. Time dependence of total stand biomass per hectare  $M(t)$  for a *P. abies* stand (site class III)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

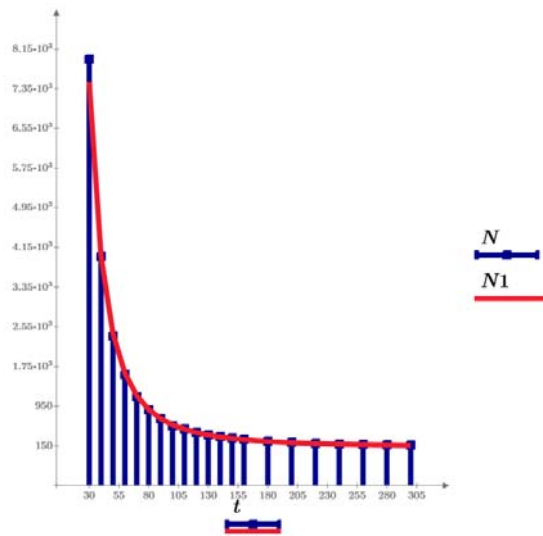


Рисунок 8. Зависимость числа деревьев на гектар  $N(t)$  от времени для древостоя *P. sibirica* (2 класс бонитета)

Figure 8. Dependence of the number of trees per hectare  $N(t)$  on time for a *P. sibirica* stand (site class II)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

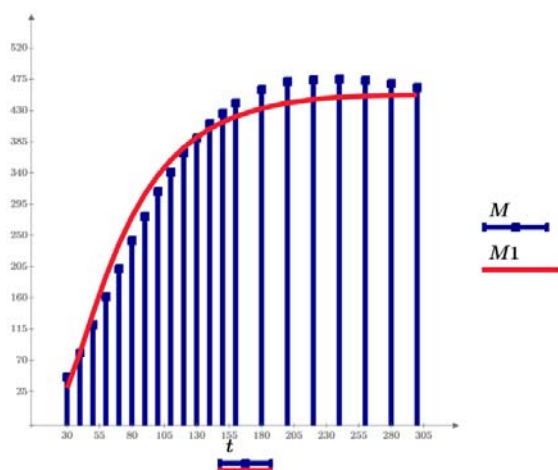


Рисунок 9. Зависимость общей биомассы древостоя на одном гектаре  $M(t)$  от времени для древостоя *P. sibirica* (2 класс бонитета)

Figure 9. Dependence of total biomass of a stand on one hectare  $M(t)$  on time for a *P. sibirica* stand (site class II)

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

### Обсуждение

Аллометрический параметр  $q$ , как указано выше, составляет 0.7 для елового древостоя и для соснового древостоя для всех бонитетов, а для кедрового древостоя он равен 0.74 для всех бонитетов, что подчеркивает как биологическую близость этих пород, так и наличие важной для моделирования константы. Это значение согласуется с данными работ М.Д. Корзухина (2019) [32] и S.E. Jorgensen (2018) [33], где приводится следующий интервал  $0.66 < q < 1$ . Параметр  $r$ , который характеризует скорость расхода ресурса, не только зависит от бонитета, но и имеет разную направленность зависимости для исследуемых древостоев. Если для елового древостоя с увеличением бонитета параметр  $r$  возрастает практически по линейному закону, то у соснового древостоя этот параметр убывает, т.е. «скорость расхода ресурса растет с увеличением бонитета для елового древостоя и убывает для соснового. Этот факт особенно интересен тем, скорость расхода ресурса уменьшается с ростом бонитета для сосновых насаждений и древостоев для достижения стационарного режима (максимального значения биомассы) требуется больше время (растет значение

$t_{max}$ ) [18]». Для еловых насаждений ситуация обратная – с ростом бонитета увеличивается скорость расхода ресурса и время достижения максимального значения биомассы снижается. В кедровых древостоях параметр  $r$  не имеет однозначной зависимости от бонитета. Объяснение такой зависимости возможно не только с лесоводческих позиций, но и исследуя процесс накопления эксергии древостоем.

Значения критерия эффективности для указанных бонитетов соснового и елового древостоев близки к 1 (см. табл. 1 и 2), а для биомассы отдельного дерева и числа деревьев на гектар отличие от 1 наблюдается только в пятом знаке после запятой, т.е. качество модели практически идеальное. Немного хуже результаты для древостоя кедр сибирского, но близость критерия эффективности к 1 по-прежнему высока, хотя она и снижена по сравнению с еловым и сосновым древостоем. Особенно, такое снижение характерно для общей биомассы насаждения. Это заметно и по соответствующему рис. 9, тогда как у двух первых древостоев эмпирические значения практически сливаются с рассчитанными по модифицированной ЭФМ (рис. 1-6). Следует отметить, что возраст физиологической спелости у древостоя кедр равен 40 годам, а первые соответствующие значения в таблице А.3. Швиденко и др. [30] начинаются с 30 лет. Поэтому преимущества модификации метода не заметно и критерий эффективности об этом свидетельствует. В табл. 4 приведены соответствующие значения параметров модели и значений критерия эффективности без учета возраста физиологической зрелости. Из анализа табл. 4 видно, что, хотя значения критерия эффективности достаточно близки к 1, но они уступают по точности соответствующим значениям табл. 1 и 2.

В таблицах даны начальные значения  $(m_0, N_0)$  и конечные значения  $(m_{\infty}, N_{\infty})$ . Начальные значения в табл. 1 и 2 взяты для момента времени  $t_{en}$ , которые одинаковы для соснового и елового древостоя у всех бонитетов за исключением 3 бонитета соснового древостоя, где отличие составляет 10 лет. Это подтверждает предположение авторов о том, что время наступления физиологической зрелости (спелости) является константой и может

использоваться в моделировании. В табл. 4 эти значения взяты как минимальные по возрасту в таблицах А.З. Швиденко и др. [30]. Конечные значения ( $m_{\infty}, N_{\infty}$ ), приведенные в таблицах, определялись в результате процедуры оптимизации по критерию эффективности. Этим объясняется небольшое отличие полученных значений ( $m_{\infty}, N_{\infty}$ ) в табл. 2 и 4.

Проведенное усовершенствование модели позволяет надеяться на ее использование для моделирования лиственных насаждений. Причем не только дубовых и березовых, а также очень важным представляется моделирование осиновых и тополевых древостоев. Особенный интерес для моделирования представляют естественные гибриды осины и тополя, которые отличаются быстрым ростом и сравнительно высокой продуктивностью. Именно это качество, а также устойчивость гибридов к поражению насекомыми и болезнями используется для создания эффективно работающих карбоновых полигонов, прежде всего в Воронежской области.

Дальнейшее применение модифицированной модели возможно «для расчета нужной в экологических приложениях величины – эксергии, которая является важнейшим экологическим индикатором для описания развития экосистемы» [26].

### Выводы

1. Модифицированная ЭФМ с высокой точностью описывает динамику роста насаждений *P. sylvestris* | *P. abies* для первых пяти бонитетов (в среднем  $NSE = 0,9997$  |  $0,9969$ ).

2. Критерий  $q$ , характеризующий аллометрию единичного дерева, составляет 0.7 как для елового

древостоя, так и для соснового древостоя для всех бонитетов и равен 0.74 для древостоя кедра сибирского. Это свидетельствует о биологической близости древостоев

3. Зависимость параметра модели  $r$ , ответственного за скорость убывания ресурса от класса бонитета для соснового древостоя отличается от такой же зависимости для елового древостоя. Направления изменения параметра  $r$  прямо противоположны. Для кедрового древостоя эта зависимость ближе к еловому. Для соснового древостоя параметр  $r$  убывает, а для елового он возрастет. Такое поведение этой зависимости нуждается в дальнейших исследованиях, используя эксергетический подход.

4. Время установления стационарного режима, соответствует времени, при котором биомасса насаждения достигает максимума.

5. Время наступления физиологической зрелости (спелости) является константой и может использоваться в моделировании.

6. Сравнение соответствующих параметров, предсказанных для одного и того же древостоя *P. sylvestris* 1 класса бонитета по модифицированной ЭФМ (критерий Нэша-Сатклифа  $NSE = 0,9940$ ) и ЭФМ без применения возраста физиологической спелости (критерий Нэша-Сатклифа  $NSE = 0,9640$ ) показывает, что модифицированная ЭФМ дает статистически более точные результаты прогнозирования общей биомассы.

### Список литературы

1. Reid W. V., Mooney H. A. The millennium ecosystem assessment: testing the limits of interdisciplinary and multi-scale science. Ecology, Economy and Society; V. Dayal et al. eds. Singapore : Springer Singapore, 2018; 4: 49-61. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-5675-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5675-8_4).
2. Harris N. L. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. Nature Climate Change. 2021; 11 (3): 234-240. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.
3. Song, X.-P. et al. Global land change from 1982 to 2016. Nature. 2018; 560 (7720): 639-643. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>.
4. Novikov A. I. et al. Scots pine seedlings growth dynamics data reveals properties for the future proof of seed coat color grading conjecture. Data. 2019; 4 (3): 106. DOI: <https://doi.org/10.3390/data4030106>.
5. Novikova T. P. Study of a set of technological operations for the preparation of coniferous seed material for reforestation. Forestry Engineering Journal. 2021; 11 (4): 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. *Inventions*. 2022; 7 (1): 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
7. Novikova T. P. Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (1): 112-128. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8>.
8. Novikova T. P. et al. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (3): 164-179. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>.
9. Novikova T. P. et al. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: the information model. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (4): 114-124. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/7>.
10. Yazici N. et al. Gene diversity in seed crop of Taurus cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) over an altitudinal range. *Geography. Environment. Sustainability*. 2023; 4 (16): 63-71. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2922>.
11. Marqués L., Camarero J. J., Zavala M.A. et al. Evaluating tree-to-tree competition during stand development in a relict Scots pine forest: How much does climate matter? *Trees*. 2021; 35: 1207-1219. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02109-8>.
12. Wood K. E. A., Kobe R. K., Ibáñez I., McCarthy-Neumann S. Tree seedling functional traits mediate plant-soil feedback survival responses across a gradient of light availability. *PLOS ONE*. 2023; 18 (11): e0293906. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293906>.
13. Kohyama T. S., Kohyama T. I., Sheil D. Estimating net biomass production and loss from repeated measurements of trees in forests and woodlands: Formulae, biases and recommendations. *Forest Ecology and Management*. 2019; 433: 729-740. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.010>.
14. Roitberg B., Li C., Lalonde R. Tree adaptive growth (TAG) model: a life-history theory-based analytical model for post-thinning forest stand dynamics / B. Roitberg, // *Frontiers in Plant Science*. 2024; 15: 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1344883>.
15. Лисицын, В.И. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода / В. И. Лисицын, М. В. Драпалюк, Н. Н. Матвеев // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2022; 3 (387): 213-225. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>.
16. Lisitsyn V.I., Matveev N.N., Saushkin V.V. Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021; 875: 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012042>.
17. Lisitsyn, V.I.; Matveev, N.N. Entropy Production Using Ecological and Physiological Models of Stand Growth Dynamics as an Example. *Forests* 2022, 13: 1948. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111948>.
18. Nielsen S.; Müller F.; Marques, J.; Bastianoni, S.; Jørgensen, S. Thermodynamics in Ecology—An Introductory Review. *Entropy*. 2020; 22: 820. DOI: <https://doi.org/10.3390/e22080820>.
19. Harold E. Burkhardt Modeling Forest Stand Dynamics, Growth and Yield *Forests*. 2021; 12: 1553. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12111553>.
20. Дубенок, Н. Н. Модель образующей древесного ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в Костромской области / Н. Н. Дубенок, А. В. Лебедев, В. В. Гостев // *Лесотехнический журнал*. 2023; 13 (4.1): 5-22. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3>.
21. Stankova T.V. A dynamic whole-stand growth model, derived from allometric relationships. *Silva Fennica*. 2016; 50 (1): 1406. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.1406>.
22. Modeling of growth and development of spruce stands in the West Siberian South taiga plain forest region P V Mikhaylov, S L Shevelev, S M Sul'tson, S V Verkhovets and A A Goroshko. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 677 (2021) 052118 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/677/5/052118
23. Matveeva R N, Bratilova N P, Butorova O F, Kolosovsky E V and Svalova A I. Siberian cedar in subordinate crops. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2020; 548: 052018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052018>.

24. Матвеева Р.Н. Изменчивость репродуктивного развития полусибов плюсовых деревьев *Pinus sibirica* Du Tour / Р. Н. Матвеева, Ю. Е. Щерба, Н. А. Шенмайер // Лесотехнический журнал. 2023; 13 (49): 99-111. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/7>.

25. Левин С.В. Эколого-биологические особенности произрастания кедра сибирского (*Pinus sibirica* du tour.) в условиях интродукции воронежской области. Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2022; 144: 25-32. <https://doi.org/10.36305/0513-1634-2022-144-25-32>.

26. Применение эколого-физиологического моделирования для описания динамики роста дубовых древостоев / В. И. Лисицын, Н. Н. Матвеев, Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова, С. В. Внукова // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции, 24-26 мая 2023 г. – Санкт-Петербург, 2023. - С. 283-286.

27. Моделирование динамики роста кедра сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour). В. И. Лисицын, Н. Н. Матвеев, Н. С. Камалова, Н. Ю. Евсикова // Физические основы современных наукоемких технологий. Материалы Международного научно-методического семинара. Воронеж, 2023, 31-38 DOI: [https://doi.org/10.58168/PBMT\\_31-38](https://doi.org/10.58168/PBMT_31-38).

28. Лисицын, В. И. Определение возраста биологической зрелости в эколого-физиологической модели динамики древостоя / В. И. Лисицын, Т. П. Новикова // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. СПб, 2023. С. 286-288.

29. Лисицын В.И., Новикова Т.П., Новиков А.И. Моделирование возраста биологической зрелости сосновых и дубовых древостоев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 246. С. 6–21. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.6-21>.

30. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных есообразующих пород Северной Евразии : нормативно-справочные материалы / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепаченко, С. Нильсон, Ю. И. Булуй. – 2-е изд., доп. М., 2008: 886. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/fqdwk>.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662105 РФ. Программа расчета динамики роста древостоев по эколого-физиологической модели, основанной на термодинамическом подходе : № 2020661370 : заявл. 01.10.2020 : опубл. 08.10.2020; заявитель ВГТУ. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/xwgo1w>.

32. Корзухин М.Д. Построение кривых хода роста древостоев на основе обобщенной модели Берталанфи по данным государственного лесного реестра // Лесоведение. 2019; 2: 105-114. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819020049>.

33. Jorgensen, S.E. Thermodynamics and ecological modelling. Boca Raton, CRC Press, 2018: 384. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482278613>.

34. Ivetić, V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić et al. // Forestry Engineering Journal. 2019; 9 (2): 56-65. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.

35. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: mathematical modeling / M. Tigabu et al. // Forests. 2021; 12 (2): 240. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020240>.

### References

1. Reid W. V., Mooney H. A. The millennium ecosystem assessment: testing the limits of interdisciplinary and multi-scale science. Ecology, Economy and Society; V. Dayal et al. eds. Singapore : Springer Singapore, 2018; 4: 49-61. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-5675-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5675-8_4).

2. Harris N. L. et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. Nature Climate Change. 2021; 11 (3): 234-240. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>.

3. Song, X.-P. et al. Global land change from 1982 to 2016. Nature. 2018; 560 (7720): 639-643. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9>.

4. Novikov A. I. et al. Scots pine seedlings growth dynamics data reveals properties for the future proof of seed coat color grading conjecture. *Data*. 2019; 4 (3): 106. DOI: <https://doi.org/10.3390/data4030106>.
5. Novikova T. P. Study of a set of technological operations for the preparation of coniferous seed material for reforestation. *Forestry Engineering Journal*. 2021; 11 (4): 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. *Inventions*. 2022; 7 (1): 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
7. Novikova T. P. Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (1): 112-128. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8>.
8. Novikova T. P. et al. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: cluster analysis of descriptors. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (3): 164-179. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/12>.
9. Novikova T. P. et al. FLR-Library reference information system for adaptive forest restoration: the information model. *Forestry Engineering Journal*. 2023; 13 (4): 114-124. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/7>.
10. Yazici N. et al. Gene diversity in seed crop of Taurus cedar (*Cedrus libani* A. Rich.) over an altitudinal range. *Geography. Environment. Sustainability*. 2023; 4 (16): 63-71. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2922>.
11. Marqués L., Camarero J. J., Zavala M.A. et al. Evaluating tree-to-tree competition during stand development in a relict Scots pine forest: How much does climate matter? *Trees*. 2021; 35: 1207-1219. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02109-8>.
12. Wood K. E. A., Kobe R. K., Ibáñez I., McCarthy-Neumann S. Tree seedling functional traits mediate plant-soil feedback survival responses across a gradient of light availability. *PLOS ONE*. 2023; 18 (11): e0293906. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293906>.
13. Kohyama T. S., Kohyama T. I., Sheil D. Estimating net biomass production and loss from repeated measurements of trees in forests and woodlands: Formulae, biases and recommendations. *Forest Ecology and Management*. 2019; 433: 729-740. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.010>.
14. Roitberg B., Li C., Lalonde R. Tree adaptive growth (TAG) model: a life-history theory-based analytical model for post-thinning forest stand dynamics / B. Roitberg, // *Frontiers in Plant Science*. 2024; 15: 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1344883>.
15. Lisitsyn, V. I. Modelirovanie dinamiki xoda rosta drevostoev na osnove termodinamicheskogo podxoda / V. I. Lisitsyn, M. V. Drapalyuk, N. N. Matveev // *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2022; 3 (387): 213-225. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>.
16. Lisitsyn V. I., Matveev N. N., Saushkin V. V. Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021; 875: 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012042>.
17. Lisitsyn V. I.; Matveev N. N. Entropy Production Using Ecological and Physiological Models of Stand Growth Dynamics as an Example. *Forests* 2022, 13: 1948. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111948>.
18. Nielsen S., Müller F., Marques J., Bastianoni S., Jørgensen S. Thermodynamics in Ecology—An Introductory Review. *Entropy*. 2020; 22: 820. DOI: <https://doi.org/10.3390/e22080820>.
19. Harold E. Burkhart Modeling Forest Stand Dynamics, Growth and Yield *Forests*. 2021; 12: 1553. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12111553>.
20. Dubenok N. N., Lebedev A. V., Gostev V. V. (2023). Modeling of stem taper of Scotch pine in the Kostroma region. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*, Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 5-22 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3>.
21. Stankova T. V. A dynamic whole-stand growth model, derived from allometric relationships. *Silva Fennica*. 2016; 50 (1): 1406. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.1406>.

22. Modeling of growth and development of spruce stands in the West Siberian South taiga plain forest region / P V. Mikhaylov, S. L. Shevelev, S. M. Sul'tson, S. V. Verkhovets, A. A. Goroshko. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 677 (2021) 052118 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/677/5/052118
23. Matveeva R. N., Bratilova N. P., Butorova O. F., Kolosovsky E. V., Svalova A. I. Siberian cedar in subordinate crops. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2020; 548: 052018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/5/052018>.
24. Matveeva R. N. Izmenchivost' reproduktivnogo razvitiya polusibov plyusovy`x derev`ev Pinus sibirica Du Tour / R. N. Matveeva, Yu. E. Shherba, N. A. Shenmajer // Lesotexnicheskij zhurnal. 2023; 13 (49): 99-111. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/7>.
25. Levin S. V. E`kologo-biologicheskie osobennosti proizrastaniya kedra sibirskogo (Pinus sibirica du tour.) v usloviyax introdukcii voronezhskoj oblasti. Byulleten` gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada. 2022; 144: 25-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.36305/0513-1634-2022-144-25-32>.
26. Primenenie e`kologo-fiziologicheskogo modelirovaniya dlya opisaniya dinamiki rosta dubovy`x drevostoev / V. I. Lisicyan, N. N. Matveev, N. S. Kamalova, N. Yu. Evsikova, S. V. Vnukova // Lesa Rossii: politika, promy`shlennost`, nauka, obrazovanie : materialy` VIII Vserossijskoj nauchno-texnicheskoy kon-ferencii, 24-26 maya 2023 g. – Sankt-Peterburg, 2023: 283-286. (In Russ.)
27. Modelirovanie dinamiki rosta kedra sibirskogo (Pinus sibirica Du Tour) / V. I. Lisiysyn, N. N. Matveev, N.S. Kamalova, N.Y. Evsikova // Fizicheskie osnovy` sovremenny`x naukoemkix tehnolo-gij. Materialy` Mezhdunarodnogo nauchno-metodicheskogo seminara. Voronezh, 2023, 31-38. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.58168/PBMT\\_31-38](https://doi.org/10.58168/PBMT_31-38).
28. Lisitsyn, V. I. Opredelenie vozrasta biologicheskoy zrelosti v e`kologo-fiziologicheskoy mode-li dinamiki drevostoya / V. I. Lisicyan, T. P. Novikova // Lesa Rossii: politika, promy`shlennost`, nauka, obrazovanie. SPb, 2023: 286-288. (In Russ.)
29. Lisitsyn V. I., Novikova T. P., Novikov A. I. Modelirovanie vozrasta biologicheskoy zrelosti osnovny`x i dubovy`x drevostoev // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoy akademii. 2023; 246: 6–21. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.6-21>.
30. Tablicy i modeli xoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovny`x esoobrazuyushhix porod Se-vernoj Evrazii : normativno-spravochny`e materialy` / A. Z. Shvidenko, D. G. Shhepashhenko, S. Nil'son, Yu. I. Buluj. – 2-e izd., dop. M., 2008: 886. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/fqdwk>.
31. Svidetel`stvo o gosudarstvennoj registracii programmy` dlya E`VM № 2020662105 RF. Program-ma rascheta dinamiki rosta drevostoev po e`kologo-fiziologicheskoy modeli, osnovannoy na termodinami-cheskom podxode: № 2020661370: zayavl. 01.10.2020: opubl. 08.10.2020; zayavitel` VSUFT. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/xwgoiw>.
32. Korzuxin M. D. Postroenie krivy`x xoda rosta drevostoev na osnove obobshhennoj modeli Berta-lanfi po danny`m gosudarstvennogo lesnogo reestra // Lesovedenie. 2019; 2: 105-114. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0024114819020049>.
33. Jorgensen S.E. Thermodynamics and ecological modelling. Boca Raton, CRC Press, 2018: 384. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482278613>.
34. Ivetic V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetic et al. // Forestry Engineering Journal. 2019; 9 (2): 56-65. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
35. Detection of Scots pine single seed in optoelectronic system of mobile grader: mathematical modeling / M. Tigabu et al. // Forests. 2021; 12 (2): 240. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020240>.

### Сведения об авторах

✉ Лисицын Виктор Иванович – кандидат физ.-мат. наук, доцент, 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-lisicyn@yandex.ru](mailto:viktor-lisicyn@yandex.ru).

*Новикова Татьяна Петровна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и микрорелектронной инженерии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 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, 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).

### Information about the authors

✉ *Victor I. Lisitsyn* – 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, 394087, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>, [viktor-lisicyn@yandex.ru](mailto:viktor-lisicyn@yandex.ru)

*Tatyana P. Novikova* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Technologies and Microelectronic Engineering, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: [novikova\\_tp.vglta@mail.ru](mailto:novikova_tp.vglta@mail.ru).

*Arthur I. Novikov* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Wood Science Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva St., 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).

✉ – Для контактов | Corresponding author


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/5>

УДК 630\*182.21




## Формирование растительности на рекультивированном карьере по добыче глины в условиях Средне-Уральского таежного района (на примере карьера в черте города Екатеринбург)

Регина А. Осипенко<sup>1</sup>, [osipenkora@m.usfeu.ru](mailto:osipenkora@m.usfeu.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-3359-3079>

Алексей Е. Осипенко<sup>1</sup>✉, [osipenkoae@m.usfeu.ru](mailto:osipenkoae@m.usfeu.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-6148-1747>

Наталья М. Ушакова<sup>2</sup>, [ushakova-18@list.ru](mailto:ushakova-18@list.ru)  <https://orcid.org/0009-0007-2960-3699>

Андрей С. Новожилов<sup>1</sup>, [novozhilov-nnsaa@yandex.ru](mailto:novozhilov-nnsaa@yandex.ru)  <https://orcid.org/0009-0008-7147-1180>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

<sup>2</sup>ООО «Тура-лес», ул. Лесная, 3, г. Верхняя Тура, 624320, Российская Федерация

Изучение растительности на нарушенных землях необходимо для решения экологических проблем и скорейшего восстановления природного потенциала таких территорий. Приведена таксационная характеристика 15-30-летних смешанных древостоев естественного и искусственного происхождения, произрастающих на рекультивированном глиняном карьере. Определен видовой состав, проективное покрытие и надземная фитомасса в абсолютно сухом виде живого напочвенного покрова. Полевые данные собраны при помощи общепринятых методов: пробных площадей и учетных площадок. Зафиксировано 39 видов живого напочвенного покрова, которые отнесены к 13 семействам и 5 ценотипам. Представлены данные о долевом распределении видов и надземной фитомассы травянистой растительности по ценотипам, а также о соотношении проективного покрытия и надземной фитомассы живого напочвенного покрова. Степень общности флористического состава исследуемых сообществ травянистых растений, определявшаяся при помощи коэффициента Жаккара, малая (от 0,24 до 0,57). В условиях района исследований на рекультивированных карьерах по добыче глины возможно сформировать высокопродуктивные смешанные насаждения с преобладанием хвойных пород. На исследуемых участках в живом напочвенном покрове доминируют виды из семейств бобовые (*Fabaceae*), Мятликовые (*Poaceae*) и Астровые (*Asteraceae*). Доминантами по проективному покрытию на исследуемых участках являются: клевер луговой (*Trifolium pratense* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg.), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), полевица собачья (*Agrostis canina* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), чина луговая (*Lathyrus pratensis* L.), бор развесистый (*Milium effusum* L.), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.), горошек лесной (*Vicia sylvatica* L.) Под пологом исследуемых древостоев преобладают растения лугового и лесолугового ценотипов. Последнее является признаком того, что лесная среда на исследуемых участках не сформировалась. Во время биологического этапа рекультивации карьеров по добыче глины в условиях Средне-Уральского таежного района рекомендуется осуществлять посев наиболее распространенных в пределах изученного карьера травянистых растений из семейств бобовые (*Fabaceae*) и мятликовые (*Poaceae*).

**Ключевые слова:** рекультивация, карьер по добыче глины, живой напочвенный покров, древостой, видовой состав, фитомасса, проективное покрытие, ценотип

**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:** Формирование растительности на рекультивированном карьере по добыче глины в условиях Средне-Уральского таежного района (на примере карьера в черте города Екатеринбург) / Р. А. Осипенко, А. Е. Осипенко, Н. М. Ушакова, А. С. Новожилов // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 70–87. – Библиогр.: с. 83–87 (29 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/5>.


*Поступила* 26.04.2024. *Пересмотрена* 13.05.2024. *Принята* 14.05.2024. *Опубликована онлайн* 17.06.2024.


Article

### Formation of vegetation at a reclaimed clay quarry in the Middle Ural taiga forest area (on the example of a quarry in Yekaterinburg)

**Regina A. Osipenko**<sup>1</sup>, [osipenkora@m.usfeu.ru](mailto:osipenkora@m.usfeu.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-3359-3079>

**Aleksey E. Osipenko**<sup>1</sup> , [osipenkoae@m.usfeu.ru](mailto:osipenkoae@m.usfeu.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-6148-1747>

**Natalia M. Ushakova**<sup>2</sup>, [ushakova-18@list.ru](mailto:ushakova-18@list.ru)  <https://orcid.org/0009-0007-2960-3699>

**Andrey S. Novozhilov**<sup>1</sup>, [novozhilov-nnsaa@yandex.ru](mailto:novozhilov-nnsaa@yandex.ru)  <https://orcid.org/0009-0008-7147-1180>

<sup>1</sup>Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

<sup>2</sup>LLC "Tura-Les", Lesnaya str., 3, Verkhnyaya Tura, 624320, Russian Federation

#### Abstract

The study of vegetation on disturbed lands is necessary to solve environmental problems and to restore the natural potential of such areas as soon as possible. The paper presents a taxation characterization of 15-30-year-old mixed stands of natural and artificial origin growing in a reclaimed clay quarry. Species composition, projective cover and aboveground phytomass in absolutely dry form of living ground cover were determined. Field data were collected using common methods: sample plots and survey plots. 39 species of living ground cover were recorded, which were classified into 13 families and 5 cenotypes. The data on the proportion distribution of species and aboveground phytomass of living ground cover by cenotypes, as well as on the ratio of projective cover and aboveground phytomass of living ground cover are presented. The degree of floristic composition commonality of the studied communities of herbaceous plants, determined by the Jaccard coefficient, is small (from 0.24 to 0.57). It was established that in the conditions of the research area at the reclaimed clay quarries, it is possible to form highly productive mixed plantations with predominance of coniferous species. At the study plots, the living ground cover is dominated by species from the families of legumes (*Fabaceae*), bluegrasses (*Poaceae*), and Asteraceae (*Asteraceae*). The dominant species in terms of projective cover at different plots are the following: red clover (*Trifolium pratense* L.), common dandelion (*Taraxacum officinale* Wigg.), tufted vetch (*Vicia cracca* L.), velvety bentgrass (*Agrostis canina* L.), smooth meadow-grass (*Poa pratensis* L.), meadow vetchling (*Lathyrus pratensis* L.), wood millet (*Milium effusum* L.), coltsfoot (*Tussilago farfara* L.), and wood vetch (*Vicia sylvatica* L.). Plants of meadow and forest-meadow cenotypes predominate under the canopy of the studied stands. The latter is an indication that the forest environment has not been formed in the study plots. During the biological stage of clay quarry reclamation in the conditions of the Middle Ural Taiga forest area, it is recommended to sow herbaceous plants from the families of legumes (*Fabaceae*) and bluegrass (*Poaceae*), which are the most widespread within the studied quarry.

**Keywords:** *reclamation, clay quarry, living ground cover, stand, species composition, phytomass, projective cover, cenotype*

**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:** Osipenko R. A., Osipenko A. E., Ushakova N. M., Novozhilov A. S. (2024). Formation of vegetation at a reclaimed clay quarry in the Middle Ural taiga forest area (on the example of a quarry in Yekaterinburg). *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 70-87 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/5>.

*Received* 26.04.2024. *Revised* 13.05.2024. *Accepted* 14.05.2024. *Published online* 17.06.2024.

## Введение

Cao W. и др. (2020) [1], Vidal-Macua J.J. и др. (2020) [2], Hendrychova M. И др. (2020) [3] отмечают, что рост площади антропогенно нарушенных земель является одной из важнейших экологических проблем. Поэтому эффективное восстановление фитоценозов на нарушенных землях, как отмечают Aronson J. и др. (2020) [4], Vlasenko M.V. и др. (2022) [5], Осипенко А.Е. и др. (2022) [6], с каждым годом становится все более актуальной задачей. Одним из наиболее распространенных направлений рекультивации является лесохозяйственное. По данным ученых Benetkova P. и др. (2020) [7], Turrión D и др. (2021) [8], Hernandez-Santin L. и др. (2024) [9] данное направление рекультивации способствует восстановлению продуктивности почвы, сохранению биоразнообразия и водных ресурсов, а также позволяет ускорить возврат нарушенных земель в хозяйственный оборот.

Финансовая сторона вопроса является немаловажным фактором при рекультивации земель отмечают Young R.E. и др. (2022) [10], Морозов А.Е. и др. (2023) [11]. Минимизация затрат может быть обеспечена путем рационального использования природного потенциала определенного вида нарушенных земель с учетом особенностей климатических и лесорастительных условий территории [12, 13] отмечают Осипенко Р.А. и др. (2020) [12], Moccillo L. и др. (2023) [13].

По мнению Rodríguez-Uña A. и др. (2020) [14], Dixon K.W. и др. (2023) [15], Копытов А.И. и др. (2024) [16] природоподобные технологии в ближайшем будущем должны стать основным инструментом восстановления экосистем на нарушенных землях. Однако выявление природных закономерностей формирования растительных сообществ осложняется тем, что на данный процесс влияет большое количество факторов (вид нарушенных земель, площадь и интенсивность негативного воздействия,

климатические условия, микро- и мезорельеф, биологические особенности растительности, взаимоотношения между различными организмами и т.д.).

Научные публикации Li Y. и др. (2024) [17], Gastauer M. и др. (2024) [18] подтверждают, что для разработки гармоничной и рациональной системы восстановления фитоценозов необходимо критически оценить имеющийся положительный и отрицательный опыт. При этом наибольшее внимание следует уделить травянистым растениям, так как живой напочвенный покров быстрее, по сравнению с древесными растениями, изменяется под воздействием изменившихся лесорастительных условий. По данным Бачуриной А.В. и др. (2020) [19], Chibrik T.S. и др. (2022) [20] травянистая растительность быстрее древесно-кустарниковой закрепляет поверхность нарушенных земель, но при этом она менее устойчива, особенно на склонах техногенных территорий. При этом травянистая растительность на первом этапе формирования лесного фитоценоза может составлять значительную конкуренцию древесной растительности, как отмечает Трещевская Э.И. и др. (2023) [21].

Цель исследования – изучение древесной и травянистой растительности на дне рекультивированного карьера по добыче глины.

## Материалы и методы

### *Объект и предмет исследований*

Объектом исследования являются естественные и искусственные древостои и живой напочвенный покров (за исключением мхов и лишайников), сформировавшиеся на дне рекультивированного карьера по добыче глины. Предметом исследования являются таксационная характеристика древостоев, видовой состав, фитомасса и проективное покрытие травянистой растительности.



## Сбор данных

Исследования проводились в июле 2022 года на территории рекультивированного глиняного карьера, расположенного в черте города Екатеринбург, на ул. Коммунистической. В соответствии с актуальным лесорастительным районированием район исследований относится к Средне-Уральскому таежному району<sup>5</sup>.

В ходе исследования применялся метод пробных площадей (ПП) и метод учетных площадок (УП) [22]. ПП охватывали участки с однородной растительностью и условиями мезо- и микрорельефа. УП закладывались на ПП по двум диагональным ходовым линиям, через равное расстояние. Всего было заложено шесть ПП прямоугольной формы. Координаты GPS и описание исследуемых древостоев представлено в табл. 1. Спутниковый снимок карьера (от 2022 года) с указанием границ

карьерной выемки и пробных площадей представлен на рис. 1.

На ПП осуществлялся сплошной пересчет деревьев по диаметру и замер 20-25 высот деревьев каждого элемента леса. Средняя высота определялась графическим способом по кривой высот. Средний диаметр древостоя - через среднюю площадь сечения стволов. Средний возраст древесных пород - по мутовкам и при помощи возрастного бурава (для лиственных пород), при этом для элементов леса естественного происхождения средний возраст устанавливался с градацией в 5 лет. Запас древостоя находился расчетным путем по таблицам объемов стволов [23]. Для определения классов бонитета использовались таблицы для древостоев замедленного, умеренного, ускоренного и быстрого роста [24].

Таблица 1

Местонахождение и описание объектов исследования

Table 1

Location and description of research objects

№ ПП   No SP	Координаты GPS, с.ш. / в.д.   GPS Coordinates, N / E	Происхождение   Origin	Год посадки   Year of Planting	Средний шаг посадки, м   Average Plant Spacing, m	Между- рядья, м   Row Spacing, m	Густота посадки, тыс. шт./га   Planting Density, ths. pcs/ha
1	56°55.302' 060°34.53'	Естественное   Natural	-	-	-	-
2	56°55.366' 060°34.52'	Естественное   Natural	-	-	-	-
3	56°55.363' 060°34.46'	Искусственное   Artificial	2006	0,75	3,4	3,9
4	50°55.441' 060°34.544'	Искусственное   Artificial	1996	0,66	2,35	4,0
5	56°55.378' 060°34.677'	Искусственное   Artificial	1996	1,14	2,5	2,6
6	56°55.277' 060°34.52'	Естественное   Natural	-	-	-	-

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

<sup>5</sup> Приказ Минприроды России от 18.08.2014 № 367 (ред. от 02.08.2023) «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.09.2014 N

34186) // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/420224339> (дата обращения: 24.02.2024)



Рисунок 1. Границы карьерной выемки и пробных площадей

Figure 1. Boundaries of the pit excavation and sample plots

Источник: собственная композиция автора; Google Карты

Source: author's composition; Google Maps

Для изучения живого напочвенного покрова (ЖНП) было заложено 120 УП размером  $0,25 \text{ м}^2$  (по 20 шт. на каждой ПП). При исследовании ЖНП, определялось видовое название, проективное покрытие каждого вида, надземная фитомасса в сыром и абсолютно сухом виде. Проективное покрытие определялось визуально по каждому виду. Затем растения на УП срезались на уровне поверхности почвы, укладывались в пакеты, маркировались биркой. В лабораторных условиях образцы разбирались по видам, взвешивались в сыром виде, высушивались при температуре  $105^\circ\text{C}$  и взвешивались повторно в абсолютно сухом состоянии. Всего было обработано более 400 навесок травянистых растений. Все виды травянистой растительности распределялись по ценотипам – лесной, лесолуговой, луговой, синантропный, прибрежный

Насаждения на ПП 1, 2, 6 имели естественное происхождение, а насаждения на ПП 3, 4, 5 – искусственное. На участках искусственного происхождения были созданы смешанные лесные культуры. Для посадки культур использовались трехлетние сеянцы ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы Сукачевы (*Larix sukaczewii* Dylis). Посадка осуществлялась в 1997 и 2007 году, вручную под меч Колесова, в отвал борозды.

#### Анализ данных

Математическая и статистическая обработка данных осуществлялась в программах MS Excel-2013 и Statistica-8. Степень общности ЖНП, произрастающего на исследуемых ПП, определялась при помощи коэффициента Жаккара [22].

## Природопользование

### Результаты

Таксационная характеристика древостоев, произрастающих на дне рекультивированного карьера, представлена в табл. 2. Все исследуемые древо-

стои являются высокопродуктивными (I-II класс бонитета) и имеют средний возраст от 15 до 30 лет. Относительная полнота насаждений варьирует в пределах от 0,36 (ПП 6) до 0,94 (ПП 1).

Таблица 2

Таксационная характеристика древостоев

Table 2

Taxation characteristics of stands

№ ПП   No SP	Состав древостоя   Stand composition	Элемент леса   Element of the forest	Средние   Average			Густота, шт./Га   Density, pcs/ha	Относительная полнота   Relative density	Абсолютная полнота, м <sup>2</sup> /га   Absolute density, m <sup>2</sup> /ha	Запас древостоя, м <sup>3</sup> /га   Stand stock, m <sup>3</sup> /ha	Класс бонитета   Quality Class
			Возраст, лет   Age, year	Высота, м   Height, m	Диаметр, см   Diameter, cm					
1	9С1Ос+Б	С	30	10,1	7,1	6336	0,85	24,9	151	II
		Ос	30	11,0	8,5	310	0,06	1,7	10	
		Б	30	7,9	4,3	597	0,03	0,9	4	
2	8С2Б	С	10	4,0	4,2	2556	0,30	3,5	11	I
		Б	10	4,3	3,4	744	0,09	0,7	2	
3	7Е2С1Б	Е	18	5,3	5,3	2702	0,44	6,0	20	I
		С	18	6,4	7,2	300	0,07	1,2	5	
		Б	20	6,8	4,9	403	0,06	8	4	
4	7С2Е1Б+Л+Ос	С	28	10,0	9,1	1624	0,44	10,6	59	II
		Е	28	9,3	7,0	590	0,11	2,3	12	
		Б	25	10,3	5,4	393	0,06	0,9	5	
		Ос	25	11,5	6,3	162	0,02	0,5	3	
		Л	25	8,0	5,4	26	0,01	0,1	1	
5	5С5Л+Б	С	28	9,4	8,2	2323	0,44	12,2	71	II
		Л	28	10,9	11,2	1052	0,34	10,4	67	
		Б	25	9,3	4,5	94	0,01	0,1	1	
6	7Ив1Кл1Чр1С+Е+Ос+Т+В	Ив	15	6,1	4,7	2019	0,2	3,5	22	II
		Кл	15	5,9	3,8	619	0,06	0,7	2	
		Чр	15	6,5	4,6	244	0,03	0,4	2	
		С	15	6,3	8,5	63	0,02	0,4	2	
		Е	15	2	4	181	0,03	0,2	1	
		Ос	15	7,8	4,8	81	0,01	0,1	1	
		Т	15	6,9	6,3	69	0,01	0,2	1	
		В	15	2,5	1,4	19	0,00	0,0	0	

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

На пяти из шести участков преобладают хвойные породы, что можно объяснить усилиями по созданию искусственных насаждений (на ПП 3-5), наличием вокруг карьера стен хвойного леса и относительно небольшой площадью исследуемого карьера (около 15 га)

На ПП 6 преобладают подлесочные виды: ива козья (*Salix caprea* L.), клен ясенелистный (*Acer negundo* L.) и черемуха Маака (*Padus maackii* (Rupr.) Kom.). Не смотря на то, что данные виды не являются лесообразующими породами, на начальной стадии формирования лесного фитоценоза подлесочные породы могут быть эдификаторами. По этой причине в табл. 2 таксационная характеристика подлесочных пород для ПП 6 приведена наравне с лесообразующими породами. На других ПП подлесок отсутствовал или произрастал в незначительном количестве, а потому не учитывался.

В табл. 3 приведено распределение надземной фитомассы ЖНП в абсолютно сухом состоянии по видам, ценотипам и пробным площадям. Флористический список ЖНП включает 39 видов из 13 семейств.

Наибольшее количество видов (23 и 24 шт.) и надземная фитомасса травянистых растений (564,55 и 419,87 кг/га) зафиксированы на ПП 4 и 6. Вероятно, это может быть связано с тем, что на данных участках древостои имеют наименьшую густоту и, по визуальной оценке, сомкнутость полога.

В табл. 4 представлено распределение количества видов ЖНП по семействам. Наибольшее количество семейств травянистых растений зафиксировано на ПП 4 и 6 (по 10 шт.), а наименьшее на ПП 2 (4 шт.). Наибольшее количество видов относятся к семействам *Asteraceae*, *Fabaceae* и *Poaceae*. Данные семейства являются типичными на нарушенных землях [25].

Таблица 3

Надземная фитомасса живого напочвенного покрова в абсолютно сухом виде под пологом исследуемых древостоев, кг/га

Table 3

Aboveground phytomass of living ground cover in absolutely dry form under the canopy of the studied stands, kg/ha

Видовое название растения   Species Name of Plant	Номер пробной площади   Sample Plot Number					
	1	2	3	4	5	6
Лесной ценотип   Forest cenotype						
Горошек лесной <i>Vicia sylvatica</i> L.	-	-	15,10	-	12,66	15,71
Грушанка круглолистная <i>Pyrola rotundifolia</i> L.	-	8,35	-	-	-	8,91
Земляника лесная <i>Fragaria vesca</i> L.	-	-	-	-	0,27	2,28
Ландыш майский <i>Convallaria majalis</i> L.	-	-	-	-	-	0,86
Ортилия однобокая <i>Orthilia secunda</i> L.	0,68	4,38	-	0,20	0,17	-
Осока лесная <i>Carex sylvatica</i> Huds	0,01	-	0,01	2,09	-	-
Хвощ лесной <i>Equisetum sylvaticum</i> L.	-	-	-	1,68	-	-
<b>Итого лесной ценотип   Total forest cenotype</b>	<b>0,69</b>	<b>12,73</b>	<b>15,11</b>	<b>3,97</b>	<b>13,1</b>	<b>27,76</b>
Лесолуговой ценотип   Forest-meadow cenotype						
Бодяк разнолистный <i>Cirsium heterophyllum</i> L.	-	1,55	-	21,74	-	-
Бор развесистый <i>Milium effusum</i> L.	1,54	3,43	2,65	33,76	15,09	7,60
Вейник наземный <i>Calamagrostis epigeios</i> L. Roth	-	-	0,30	84,38	-	-
Вероника дубравная <i>Veronica chamaedrys</i> L.	-	-	0,08	-	-	7,45
Ежа сборная <i>Dactylis glomerata</i> L.	-	-	-	-	-	7,38
Золотарник обыкновенный <i>Solidago virgaurea</i> L.	-	-	0,10	-	-	0,18
Клевер люпиновидный <i>Lupinus pentaphyllus</i> Moench	0,46	-	-	-	1,65	-
Лапчатка прямостоячая <i>Potentilla erecta</i> L.	-	-	-	0,07	-	-

## Природопользование

Видовое название растения   Species Name of Plant	Номер пробной площади   Sample Plot Number					
	1	2	3	4	5	6
Манжетка обыкновенная <i>Alchemilla vulgaris</i> L.	-	-	-	-	-	7,62
Морковник обыкновенный <i>Silaum silaus</i> L. Schinz et Thell.	-	-	-	3,19	-	7,30
Подмаренник северный <i>Galium boreale</i> L.	-	-	-	8,57	3,06	4,22
Подорожник ланцетолистный <i>Plantago lanceolata</i> L.	-	-	-	-	0,11	-
Полевица собачья <i>Agrostis canina</i> L.	0,26	32,96	1,82	9,58	17,71	5,41
Ястребинка зонтичная <i>Hieracium umbellatum</i> L.	-	-	9,28	-	0,46	-
<b>Итого лесолуговой ценотип   Total forest-meadow cenotype</b>	<b>2,26</b>	<b>37,94</b>	<b>14,23</b>	<b>161,29</b>	<b>38,08</b>	<b>47,16</b>
Луговой ценотип   Meadow cenotype						
Горошек мышиный <i>Vicia cracca</i> L.	5,55	0,90	21,28	1,86	0,21	-
Клевер луговой <i>Trifolium pratense</i> L.	18,18	211,73	69,64	262,11	36,78	218,86
Мятлик луговой <i>Poa pratensis</i> L.	0,66	4,27	19,86	-	1,89	7,22
Нивяник обыкновенный <i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.	-	-	0,24	0,07	0,44	-
Овсяница луговая <i>Festuca pratensis</i> Huds.	-	-	-	31,48	-	3,19
Пастернак посевной <i>Pastinaca sativa</i> L.	-	-	-	-	-	17,84
Тысячелистник обыкновенный <i>Achillea millefolium</i> L.	-	-	-	0,01	-	-
Чина луговая <i>Lathyrus pratensis</i> L.	3,34	13,83	46,06	28,32	0,38	10,67
<b>Итого луговой ценотип   Total meadow cenotype</b>	<b>27,73</b>	<b>230,73</b>	<b>157,08</b>	<b>323,85</b>	<b>39,7</b>	<b>257,78</b>
Синантропный ценотип   Synanthropic cenotype						
Донник лекарственный <i>Melilotus officinalis</i> L.	-	-	-	1,56	-	1,78
Иван-чай узколистный <i>Chamaenerion angustifolium</i> L.	-	-	1,34	3,05	1,96	13,71
Клевер ползучий <i>Trifolium repens</i> L.	0,02	-	-	-	-	-
Лопух малый <i>Arctium minus</i> Hill Bernh.	-	-	-	-	-	10,66
Мать-и-мачеха обыкновенная <i>Tussilago farfara</i> L.	0,11	-	-	36,62	2,40	36,39
Одуванчик лекарственный <i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	1,13	2,97	5,51	24,69	1,91	16,31
Пижма обыкновенная <i>Tanacetum vulgare</i> L.	-	-	-	3,97	3,92	-
Полынь обыкновенная <i>Artemisia vulgaris</i> L.	-	-	3,35	4,23	0,32	1,04
<b>Итого синантропный ценотип   Total synanthropic cenotype</b>	<b>1,26</b>	<b>2,97</b>	<b>10,2</b>	<b>74,12</b>	<b>10,51</b>	<b>79,89</b>
Прибрежный ценотип   Coastal cenotype						
Гравилат речной <i>Geum rivale</i> L.	-	-	0,56	-	0,04	7,28
Тростник южный <i>Phragmites australis</i> L.	-	-	-	1,32	-	-
<b>Итого прибрежный ценотип   Total coastal cenotype</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,56</b>	<b>1,32</b>	<b>0,04</b>	<b>7,28</b>
<b>Всего   Total</b>	<b>31,94</b>	<b>284,37</b>	<b>197,18</b>	<b>564,55</b>	<b>101,43</b>	<b>419,87</b>

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Распределение количества видов живого напочвенного покрова по семействам

Table 4

Distribution of the number of living ground cover species by families

Семейство	Номер пробной площади					
	1	2	3	4	5	6
Астровые ( <i>Asteraceae</i> )	2	2	5	7	6	5
Бобовые ( <i>Fabaceae</i> )	5	3	4	4	5	4
Вересковые ( <i>Ericaceae</i> )	1	2	-	1	1	1
Зонтичные ( <i>Umbelliferae</i> )	-	-	-	1	-	1
Кипрейные ( <i>Onagraceae</i> )	-	-	1	1	1	1
Мареновые ( <i>Rubiaceae</i> )	-	-	-	1	1	1
Мятликовые ( <i>Poaceae</i> )	3	3	4	5	3	5
Норичниковые ( <i>Scrophulariaceae</i> )	-	-	1	-	-	1
Осоковые ( <i>Cyperaceae</i> )	1	-	1	1	-	-
Подорожниковые ( <i>Plantaginaceae</i> )	-	-	-	-	1	-
Розоцветные ( <i>Rosaceae</i> )	-	-	1	1	2	2
Спаржевые ( <i>Asparagaceae</i> )	-	-	-	-	-	1
Хвощовые ( <i>Equisetaceae</i> )	-	-	-	1	-	-
Всего   Total	12	10	17	23	20	22

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Распределение доли видов живого напочвенного покрова по ценотипам представлено на рис. 2.

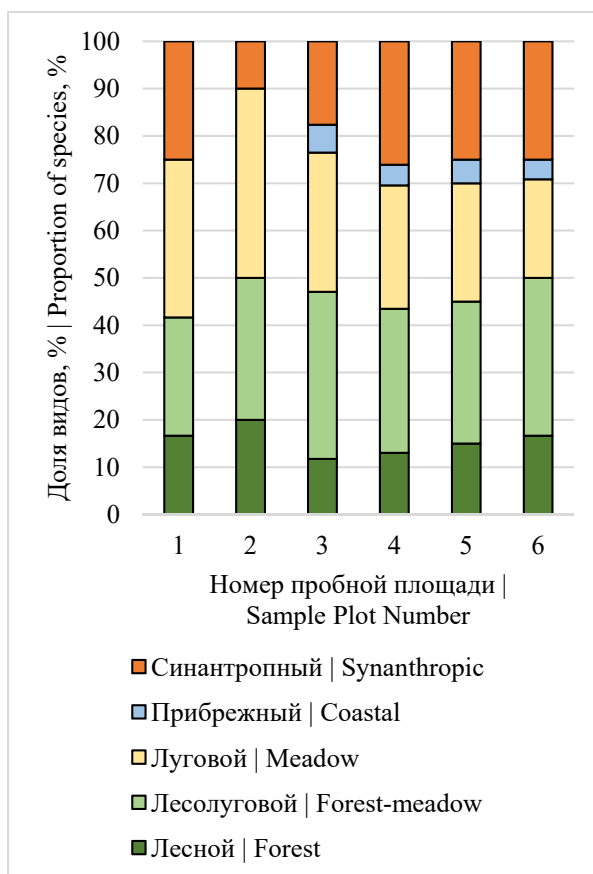


Рисунок 2. Долевое распределение видов живого напочвенного покрова по ценотипам

Figure 2. Proportion distribution of living ground cover species by cenotype

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

На рис. 3 приведено долевое распределение надземной фитомассы ЖНП по ценотипам.

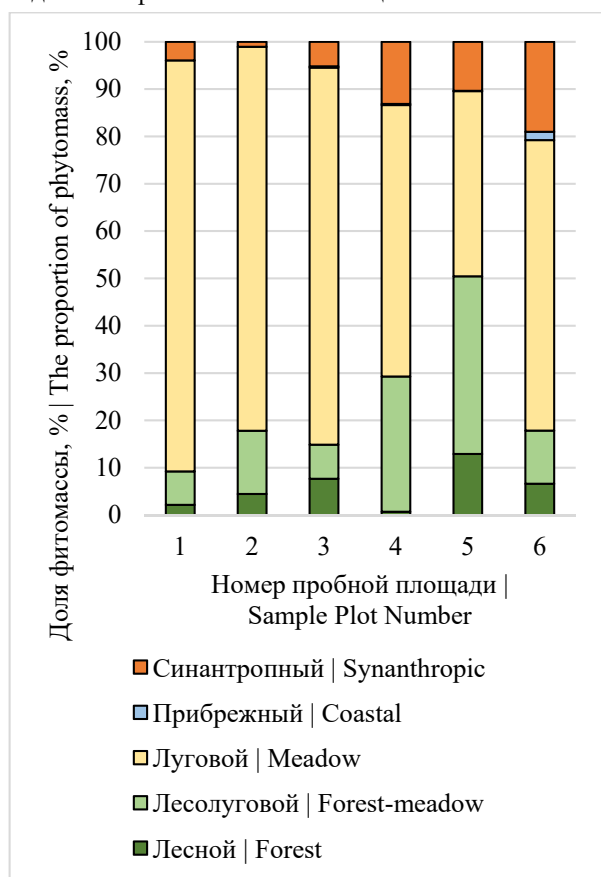


Рисунок 3. Распределение надземной фитомассы живого напочвенного покрова по ценотипам  
Figure 3. Distribution of aboveground phytomass of living ground cover by cenotypes

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition

На рис. 4 приведены данные о среднем проективном покрытии и фитомассе ЖНП под пологом исследуемых древостоев. Пробные площади на рис. 4 приведены в порядке увеличения густоты древостоев.

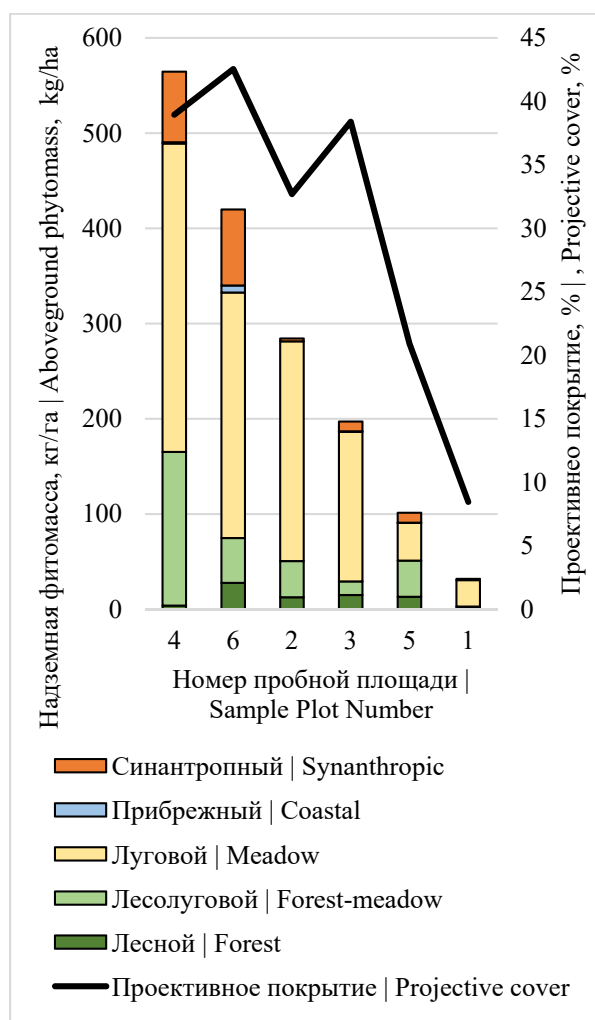


Рисунок 4. Соотношение проективного покрытия и надземной фитомассы живого напочвенного покрова различных ценотипов  
Figure 4. Ratio of projective cover and aboveground phytomass of living ground cover by different cenotypes

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition

По проективному покрытию на всех участках доминирующим видом является *Trifolium pratense* L. На ПП 3, 4, 6 доминирующим видом также является *Taraxacum officinale* Wigg. Помимо указанных видов к доминирующим можно отнести на ПП 1 – *Vicia cracca* L.; ПП 2 – *Agrostis canina* L.; ПП 3 – *Vicia cracca* L., *Poa pratensis* L., *Lathyrus pratensis* L.; 4 – *Milium effusum* L., *Lathyrus pratensis* L., *Tussilago farfara* L.; ПП 5 – *Agrostis canina* L., *Milium effusum* L., *Vicia sylvatica* L.; ПП 6 – *Tussilago farfara* L.

Наибольшая доля видов ЖНП на исследуемых участках отнесена к лесолуговому и луговому ценотипам: от 25,0 до 35,3 % и от 20,8 до 40,0 % соответственно. По доле надземной фитомассы преобладают виды лугового цено типа (64,8 % от общей фитомассы исследуемых участков). Наибольший вклад в фитомассу луговых растений вносят бобовые: *Trifolium pratense* L., *Lathyrus pratensis* L. На долю лесолугового цено типа приходится 18,8 % надземной фитомассы ЖНП. По проективному покрытию также доминируют растения лугового цено типа, покрывающие 50 % площади. На долю лесолуговых видов приходится 22,5 % проективного покрытия ЖНП.

На синантропные виды приходится от 10,0 до 26,1 % видового разнообразия травянистых растений исследуемых участков, а также в 11,2 % надземной фитомассы и 19,3% проективного покрытия ЖНП. Среди синантропных видов наибольшее распространение получили *Taraxacum officinale* Wigg. и *Tussilago farfara* L. Наличие значительной доли синантропных видов объясняется близостью карьера к садовому товариществу, наличием рекреационной нагрузки на рекультивированную часть карьера, а кроме того часть карьерной выемки используется в качестве полигона твердых бытовых отходов, что, вероятнее всего, также способствует распространению синантропов.

Доля лесных видов под пологом исследуемых древостоев варьирует в пределах от 11,8 до 20%. На лесные виды приходится в среднем 4,6 % надземной фитомассы, 7,5 % проективного покрытия ЖНП. Из числа лесных видов наибольшим проективным покрытием обладают *Vicia sylvatica* L. и *Pyrola rotundifolia* L.

Прибрежный цено тип является наименее представленным. На всех ПП зафиксировано всего два вида этого цено типа. По проективному покрытию на виды данного цено типа приходится 0,8 % площади, доля надземной фитомассы в абсолютно сухом виде составляет около 0,6 %. Наличие прибрежных видов на исследуемых участках можно объяснить периодическим подтоплением и застоем влаги в понижениях мезо- и микрорельефа.

На рис. 5 и 6 приведены данные о среднем количестве видов и средней надземной фитомассе ЖНП по цено типам. На графике квадратной точкой

обозначено среднее значение, ящиком – среднее значение при доверительном интервале 0,95, усами – максимальное и минимальное значения выборки. Данные рис. 5 и 6 более наглядно отражают описанные выше закономерности и позволяют получить общее представление о живом напочвенном покрове исследуемого глиняного карьера.

В табл. 5 приведены расчетные значения коэффициента Жаккара. Данные таблицы свидетельствуют о малом флористическом сходстве исследуемых сообществ травянистых растений [22]. Последнее можно объяснить влиянием древесной растительности, которая весьма сильно отличается по своим таксационным показателям.

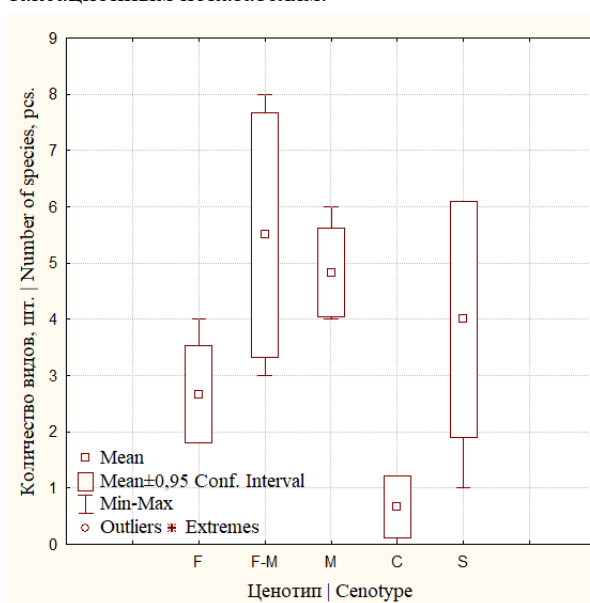


Рисунок 5. Среднее количество видов живого напочвенного покрова по цено типам: F – лесной, F-M – лесолуговой, M – луговой, C – прибрежный, S – синантропный

Figure 5. Average quantity of living ground cover species by cenotypes: F – forest, F-M – forest-meadow, M – meadow, C – coastal, S – synanthropic

Источник: собственная композиция автора  
Source: author's composition



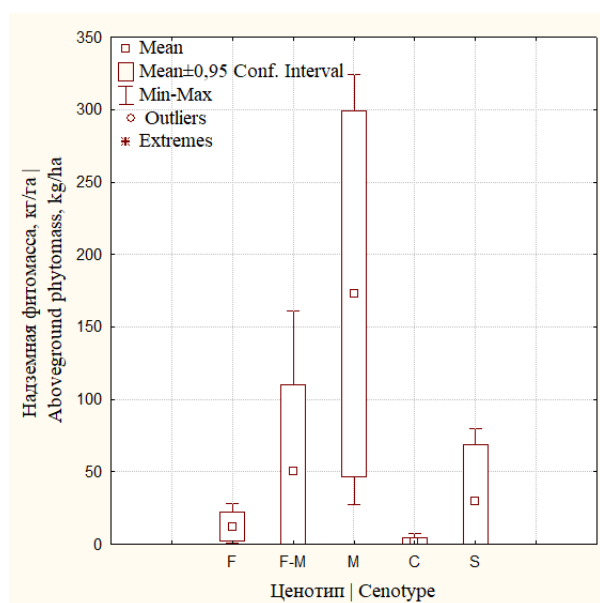


Рисунок 6. Средняя надземная фитомасса живого напочвенного покрова по центипам: F – лесной, F-M – лесолуговой, M – луговой, C – прибрежный, S – синантропный

Figure 6. Average aboveground phytomass of leaving ground cover by cenotypes: F – forest, F-M – forest-meadow, M – meadow, C – coastal, S – synanthropic

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Таблица 5

Расчетные значения коэффициента Жаккара для видов ЖНП на исследуемых участках

Table 5

Estimated values of Jaccard coefficient for living ground cover species at the study plots

№ ПП   No SP	1	2	3	4	5	6
1	-	0,57	0,38	0,35	0,45	0,24
2	0,57	-	0,35	0,32	0,36	0,26
3	0,38	0,35	-	0,38	0,54	0,41
4	0,35	0,32	0,38	-	0,43	0,34
5	0,45	0,36	0,54	0,43	-	0,42
6	0,24	0,26	0,41	0,34	0,42	-

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

### Обсуждение

В целом полученные результаты подтверждают результаты наших предыдущих исследований, проведенных на других выработанных карьерах по добыче глин [25]. Однако отличительной чертой фитоценозов, описанных в текущей работе, является их довольно маленькая площадь. Последнее могло стать причиной значительного влияния бокового освещения на растительность. Вероятно, по этой причине виды лугового и лесолугового центипа так широко распространены даже под пологом 30-летнего древостоя.

В составе ЖНП на всех ПП присутствуют следующие виды: *Milium effusum* L., *Trifolium pratense* L., *Taraxacum officinale* Wigg., *Agrostis canina* L., *Lathyrus pratensis* L.. Также очень распространены (на 5 из 6 ПП): *Vicia cracca* L. и *Poa pratensis* L. Исходя из того, что данные виды были зафиксированы

практически повсеместно на исследуемом рекультивированном карьере, можно считать их, кроме одуванчика лекарственного (по причине его агрессивности), перспективными для посева при биологическом этапе рекультивации, в качестве растений, способных самовоспроизводиться и способствовать улучшению почвы [8]. Однако следует учитывать, что вопрос подбора травянистых видов в каждом конкретном случае требует более детального изучения и масштабных исследований [26, 27]. Указанные виды растений относятся к лесолуговому, луговому и синантропному центипам, что свидетельствует о том, что лесная среда под пологом исследуемых древостоев еще не сформировалась. Данный факт также подтверждается данными о распределении надземной фитомассы, проективного покрытия и количества видов по центипам (рис. 2, 3).

Если сравнивать ЖНП на самозарастающих и рекультивированных участках, то существенных различий в данном компоненте насаждений не наблюдается. Количество видов ЖНП на участках самозарастания составляет  $14,7 \pm 10,8$  видов, а на участках рекультивированных –  $20,0 \pm 5,1$  шт. (при уровне надежности 90 %). t-критерий Стьюдента (2,44, при  $p = 0,067$ ) также не показал достоверных различий. Таким образом, по имеющимся данным нельзя сказать, что под пологом искусственных древостоев произрастает достоверно большее количество видов. Влияние происхождения фитоценозов (естественное или искусственное) на надземную фитомассу ЖНП и долевое участие различных ценотипов также доказать не удалось. По нашим данным характеристики ЖНП в большей степени зависят от возраста, густоты и полноты древостоев, а нет от происхождения последних.

Ориентировочно в 2016 году, сразу после окончания разработки, северо-западная часть карьера (примерно 1/3 часть от его общей площади) была отдана под полигон твердых бытовых отходов (ТБО). В 2023 году полигон ТБО был расширен еще и на северо-восточную часть карьера. Однако на этом участке еще в 1997 году были созданы лесные культуры, в том числе исследуемые участки (ПП 4 и 5). На сегодняшний день исследуемые 28-летние фитоценозы искусственного происхождения уничтожены. Описанная ситуация показывает, что у лиц, ответственных за данную территории, не было четкой стратегии дальнейшего использования территории карьера после окончания его разработки. Такое положение вещей нельзя назвать рациональным подходом к природопользованию. Кроме того, решение по созданию полигона ТБО не учитывает мнение местного населения. Общественность негативно относится к размещению свалки в непосредственной близости к их садовым участкам. Неудобство создают периодически происходящие пожары в толще мусора и неприятные запахи. Дополнительной причиной недовольства является тот факт, что выработанная часть карьера (до размещения полигона ТБО и его расширения) была местом отдыха. Точкой притяжения для рекреантов было оз. Сампириш, созданное на дне карьера для отведения излишков воды. Практика использования карьеров в качестве рекреационных зон применяется как в России, так и в зарубежных

странах [28, 29]. Вероятно, при более рациональном подходе, описываемый выработанный карьер мог быть использован в целях улучшения условий жизни местного населения.

Дальнейшие исследования на выработанном глиняном карьере, расположенном на ул. Коммунистической г. Екатеринбург, могут быть направлены на изучение растительности на полигоне ТБО, так как подобные объекты, по всей видимости, будут и в дальнейшем появляться на территории района исследований. Также необходимо изучить субстрат, на котором произрастают исследуемые фитоценозы, так как его характеристики (в случае значительных различий на разных ПП), могли оказать влияние на результаты исследования.

### Выводы

1. Лесорастительные условия на рекультивированных карьерах по добыче глины в условиях Средне-Уральского таежного района позволяют выращивать высокопродуктивные (I-II класс бонитета) смешанные насаждения с преобладанием хвойных пород.

2. Живой напочвенный покров на шести исследуемых участках характеризуется малым флористическим сходством и весьма сильно различается по надземной фитомассе, проективному покрытию и распределению видов по ценотипам, что является следствием значительных различий в таксационных показателях древостоев.

3. На исследуемых участках в живом напочвенном покрове доминируют виды из семейств *Fabaceae*, *Poaceae* и *Asteraceae*, при этом на долю данных семейств приходится 62,4, 18,3 и 11,9 % надземной фитомассы. Наибольшая доля фитомассы (51,1 %) приходится на единственный вид: *Trifolium pratense* L.

4. По количеству видов травянистых растений и проективному покрытию на исследуемых участках преобладают растения лугового и лесолугового ценотипов, что свидетельствует о том, что лесная среда под пологом исследуемых древостоев еще не сформировалась.

5. Влияние происхождения фитоценоза на характеристику живого напочвенного покрова в рамках нашего исследования доказать не удалось.

6. Во время биологического этапа рекультивации карьеров по добыче глины в условиях Средне-

Уральского таежного района до или во время создания лесных культур рекомендуется осуществлять посев следующих травянистых растений: *Trifolium pratense* L., *Lathyrus pratensis* L., *Vicia cracca* L. *Milium effusum* L., *Agrostis canina* L., *Poa pratensis* L.

Данная мера поспособствует накоплению органических веществ в субстрате, что ускорит процесс почвообразования.

### Список литературы

1. Cao W., Sofia G., Tarolli P. Geomorphometric characterisation of natural and anthropogenic land covers. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2020; 7:2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0314-x>.
2. Vidal-Macua J. J., Nicolau J. M., Vicente E., Heras M. M. Assessing vegetation recovery in reclaimed opencast mines of the Teruel coalfield (Spain) using Landsat time series and boosted regression trees. *Science of The Total Environment*. 2020; 717: 137250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137250>.
3. Hendrychova M., Svobodova K., Kabrna M. Mine reclamation planning and management: Integrating natural habitats into post-mining land use. *Resources Policy*. 2020; 69: 101882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101882>.
4. Aronson J., Goodwin N., Orlando L., Eisenberg C., Cross A.T. A world of possibilities: Six restoration strategies to support the United Nation's Decade on Ecosystem Restoration. *Restoration Ecology*. 2020; 28: 730–736. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13170>.
5. Vlasenko M.V., Rybashlykova L.P., Turko S.Y. Restoration of Degraded Lands in the Arid Zone of the European Part of Russia by the Method of Phytomelioration. *Agriculture*. 2022; 12 (3): 437. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12030437>.
6. Осипенко А.Е., Башегуров К.А., Корчагин И.Е., Панин И.А., Осипенко Р.А., Щеплягин П.В., Искендерова Е.С., Котова В.С. Характеристика древесной и кустарниковой растительности, произрастающей на Исетском гранитном карьере. *Леса России и хозяйство в них*. 2022; 3 (82): 39-48. DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2022.80.43.005>.
7. Benetkova P., Tichy L., Haněl L., Kukla J., Vicentini F., Frouz J, The effect of soil and plant material transplants on vegetation and soil biota during forest restoration in a limestone quarry: A case study. *Ecological Engineering*. 2020; 158: 106039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106039>.
8. Turrion D, Morcillo L, Alloza JA, Vilagrosa A. Innovative Techniques for Landscape Recovery after Clay Mining under Mediterranean Conditions. *Sustainability*. 2021; 13 (6): 3439. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13063439>.
9. Hernandez-Santin L., Gagen E.J., Erskine P.D., Setting restorative goals with a regional outlook: Mine-rehabilitation outcomes influence landscape connectivity. *Journal of Environmental Management*. 2024; 357: 120778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120778>.
10. Young R.E., Gann G.D., Walder B., Liu J., Cui W., Newton V., Nelson C.R., Tashe N., Jasper D., Silveira F.A.O., Carrick P.J., Hägglund T., Carlsen S., Dixon K. International principles and standards for the ecological restoration and recovery of mine sites. *Restoration Ecology*. 2022; 30: e13771. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13771>.
11. Морозов А.Е., Белов Л.А., Башегуров К.А., Залесов С.В., Розинкина Е.П. Естественное зарастание песчаных карьеров в условиях Западно-Сибирского северо-таежного равнинного лесного района. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2023; (243): 86-99. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.243.86-99>.
12. 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. ВР Филиппова*. 2020; 3 (60): 111-117. DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2020.60.3.017>.
13. Morcillo L., Turrión D., Fuentes D., Vilagrosa A. Drone-based assessment of microsite-scale hydrological processes promoted by restoration actions in early post-mining ecological restoration stages. *Journal of Environmental Management*. 2023; 348: 119468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119468>.

14. Rodríguez-Uña A., Cruz-Alonso V., Rohrer Z., Martínez-Baroja L. Fresh perspectives for classic forest restoration challenges. *Restoration Ecology*. 2020; 28: 12–15. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13093>.
15. Dixon K.W., Campbell T.A. New Gold Standard in Mine Site Restoration to Drive Effective Restoration Outcomes. In: Florentine, S., Gibson-Roy, P., Dixon, K.W., Broadhurst, L. (eds) *Ecological Restoration*. Springer, Cham. 2023; 399–433. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25412-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25412-3_11).
16. Копытов А.И., Новоселов С.В., Куприянов А.Н., Куприянов О.А. Тенденции развития угольной промышленности Кузбасса и перспективы восстановления природных экосистем в аспекте энергетического перехода до 2050 г. *Уголь*. 2024; (3): 87-93. DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-3-87-93>.
17. Li Y., Wang L., Cao Q., Yang L., Jiang W. Revealing ecological restoration process and disturbances of mineral concentration areas based on multiscale and multisource data. *Applied Geography*. 2024; 162: 103155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103155>.
18. Gastauer M., Pinheiro T., Caldeira C.F., Ramos S.J., Coelho R.R., Fonseca D.S., Tyski L., Cardoso A.L.R., Carvalho Neto C.S., Guimarães L., Sarmento P.S.M. Large-scale forest restoration generates comprehensive biodiversity gains in an Amazonian mining site. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 443: 140959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140959>.
19. Бачурина А.В., Залесов С.В., Толкач О.В. Эффективность лесной рекультивации нарушенных земель в зоне влияния медеплавильного производства. *Экология и промышленность России*. 2020; 24 (6): 67-71. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-6-67-71>.
20. Chibrik T.S., Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A., Rakov E.A. Influence of recultivation methods on formation of ash dump phytocenosis in taiga zone (Middle Urals). *AIP Conference Proceedings: Proceedings of the International Scientific Conference*. 2022; 2390: 030010. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0069037>.
21. Трещевская Э.И., Тихонова Е.Н., Голядкина И.В., Трещевская С.В., Якимов Н.И. Динамика естественного зарастания травянистой растительностью насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при рекультивации гидроотвала Курской магнитной аномалии. *Лесотехнический журнал*. 2023; 13. 3 (51): 117-130. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/9>.
22. Бунькова Н.П., Залесов С.В., Залесова Е.С., Магасумова А.Г., Осипенко Р.А. Основы фитомониторинга: учеб. пособие; изд. 3-е, дополненное и переработанное. Екатеринбург: УГЛТУ. 2020: 90. ISBN 978-5-94984-727-5 Режим доступа: <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9766> (дата обращения: 24.02.2024).
23. Нагимов З.Я. Лысов Л.А., Коростелев И.Ф., Соколов С.В., Соловьев В.М., Фимушин Б.С., Шевелина И.В., Анчугова Г.В. Нормативно-справочные материалы по таксации лесов Урала: Учебное пособие. Екатеринбург: УГЛТУ. 2002: 160. ISBN 5-230-25721-0. Режим доступа: <https://e.twirpx.link/file/2410257/>
24. Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалев А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос. 1992: 495. ISBN 5-10-001344-3. Режим доступа: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/taksac/index.htm>
25. Залесов С.В., Зарипов Ю.В., Осипенко Р.А. Опыт лесохозяйственного направления рекультивации нарушенных земель при разработке месторождений глины, хризотил-асбеста и редкоземельных руд. Екатеринбург: УГЛТУ. 2022: 282. ISBN 978-5-94984-834-0.
26. Ortega R., Domene M.A., Soriano M., Sánchez-Marañón M., Asensio C., Miralles I. Improving the fertility of degraded soils from a limestone quarry with organic and inorganic amendments to support vegetation restoration with semiarid Mediterranean plants. *Soil and Tillage Research*. 2020; 204: 104718. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104718>.
27. Massante J.C., Castro A.F., Sarmento P.S.M., Silva G.M., Caldeira C.F., Ramos S., Gastauer M. Species selection for optimizing mine land rehabilitation: Integrating functional traits with the minimum set prioritization technique. *Ecological Engineering*. 2023; 194: 107039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107039>.

28. Галдин Р.Е., Алейникова Н.В., Ярмош Т.С. Формирование рекреационных зон путем использования нарушенных городских земель. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021; (12): 73-83. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-12-73-83>.

29. Kurowska E.E., Czerniak A., Bańkowski J. The Rationale for Restoration of Abandoned Quarries in Forests of the Ślęza Massif (Poland) in the Context of Sustainable Tourism and Forest Environment Protection. *Forests*. 2023; 14 (7): 1386. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14071386>.

### References

1. Cao W., Sofia G., Tarolli P. Geomorphometric characterisation of natural and anthropogenic land covers. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2020; 7:2. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0314-x>.

2. Vidal-Macua J.J., Nicolau J.M., Vicente E., Heras M.M. Assessing vegetation recovery in reclaimed opencast mines of the Teruel coalfield (Spain) using Landsat time series and boosted regression trees. *Science of The Total Environment*. 2020; 717: 137250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137250>.

3. Hendrychova M., Svobodova K., Kabrna M. Mine reclamation planning and management: Integrating natural habitats into post-mining land use. *Resources Policy*. 2020; 69: 101882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101882>.

4. Aronson J., Goodwin N., Orlando L., Eisenberg C., Cross A.T. A world of possibilities: Six restoration strategies to support the United Nation's Decade on Ecosystem Restoration. *Restoration Ecology*. 2020; 28: 730–736. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13170>.

5. Vlasenko M.V., Rybashlykova L.P., Turko S.Y. Restoration of Degraded Lands in the Arid Zone of the European Part of Russia by the Method of Phytomelioration. *Agriculture*. 2022; 12 (3): 437. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12030437>.

6. Osipenko A.E., Bashegurov K.A., Korchagin I.E., Panin I.A., Osipenko R.A., Shcheplyagin P.V., Iskenderova E.S., Kotova V.S. Harakteristika drevesnoj i kustarnikovej rastitel'nosti, proizrastayushchej na Isetskom granitnom kar'ere. [Characteristics of tree and shrub vegetation growing on the Iset granite quarry]. *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih*. [Forests of Russia and economy in them]. 2022; 3 (82): 39-48. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2022.80.43.005>.

7. Benetkova P., Tichy L., Haněl L., Kukla J., Vicentini F., Frouz J, The effect of soil and plant material transplants on vegetation and soil biota during forest restoration in a limestone quarry: A case study. *Ecological Engineering*. 2020; 158: 106039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106039>.

8. Turrion D, Morcillo L, Alloza JA, Vilagrosa A. Innovative Techniques for Landscape Recovery after Clay Mining under Mediterranean Conditions. *Sustainability*. 2021; 13 (6): 3439. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13063439>.

9. Hernandez-Santin L., Gagen E.J., Erskine P.D., Setting restorative goals with a regional outlook: Mine-rehabilitation outcomes influence landscape connectivity. *Journal of Environmental Management*. 2024; 357: 120778. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120778>.

10. Young R.E., Gann G.D., Walder B., Liu J., Cui W., Newton V., Nelson C.R., Tashe N., Jasper D., Silveira F.A.O., Carrick P.J., Hägglund T., Carlsen S., Dixon K. International principles and standards for the ecological restoration and recovery of mine sites. *Restoration Ecology*. 2022; 30: e13771. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13771>.

11. Morozov A.E., Belov L.A., Bashegurov K.A., Zalesov S.V., Rozinkina E.P. Estestvennoe zarastanie peschanyh kar'erov v usloviyah Zapadno-Sibirskogo severo-taezhnogo ravninnogo lesnogo rajona. [Natural overgrowth of sand quarries in the conditions of the Western Siberian north taiga plain forest region]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotehničeskoj akademii*. 2023; (243): 86-99. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.243.86-99>.

12. Osipenko R.A., Osipenko A.E., Zaripov Yu.V., Zalesov S.V. Formirovanie estestvennyh fitocenzozov na vyrabotannom kar'ere kirpichnoj gliny kak nachal'nyj etap dal'nejshego lesorazvedeniya. [Formation of natural phytocenoses on the abandoned pit of brick clay as the initial stage of further forest]. *Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj*

sel'skokozyajstvennoj akademii im. VR Filippova. [Bulletin of the BSSA named after V. R. Filippov]. 2020; 3 (60); 111-117. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2020.60.3.017>.

13. Morcillo L., Turrión D., Fuentes D., Vilagrosa A. Drone-based assessment of microsite-scale hydrological processes promoted by restoration actions in early post-mining ecological restoration stages. *Journal of Environmental Management*. 2023; 348: 119468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119468>.

14. Rodríguez-Uña A., Cruz-Alonso V., Rohrer Z., Martínez-Baroja L. Fresh perspectives for classic forest restoration challenges. *Restoration Ecology*. 2020; 28: 12–15. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13093>.

15. Dixon K.W., Campbell T.A. New Gold Standard in Mine Site Restoration to Drive Effective Restoration Outcomes. In: Florentine, S., Gibson-Roy, P., Dixon, K.W., Broadhurst, L. (eds) *Ecological Restoration*. Springer, Cham. 2023; 399–433. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25412-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25412-3_11).

16. Kopytov A.I., Novoselov S.V., Kupriyanov A.N., Kupriyanov O.A. Tendencii razvitiya ugol'noj promyshlennosti Kuzbassa i perspektivy vosstanovleniya prirodnyh ekosistem v aspekte energeticheskogo perekhoda do 2050 g. [Trends in the development of the Kuzbass coal industry and prospects for the restoration of natural ecosystems in the aspect of energy transition until]. *Ugol'*. 2024; (3): 87-93. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-3-87-93>.

17. Li Y., Wang L., Cao Q., Yang L., Jiang W. Revealing ecological restoration process and disturbances of mineral concentration areas based on multiscale and multisource data. *Applied Geography*. 2024; 162: 103155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103155>.

18. Gastauer M., Pinheiro T., Caldeira C.F., Ramos S.J., Coelho R.R., Fonseca D.S., Tyski L., Cardoso A.L.R., Carvalho Neto C.S., Guimarães L., Sarmento P.S.M. Large-scale forest restoration generates comprehensive biodiversity gains in an Amazonian mining site. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 443: 140959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140959>.

19. Bachurina A.V., Zalesov S.V., Tolkach O.V. Effektivnost' lesnoj rekul'tivacii narushennyh zemel' v zone vliyaniya medeplavil'nogo proizvodstva. [The effectiveness of disturbed lands forest reclamation in the zone of copper-melting works]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. [Ecology and Industry of Russia]. 2020; 24 (6): 67-71. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-6-67-71>.

20. Chibrik T.S., Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A., Rakov E.A. Influence of recultivation methods on formation of ash dump phytocenosis in taiga zone (Middle Urals). *AIP Conference Proceedings: Proceedings of the International Scientific Conference*. 2022; 2390: 030010. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0069037>.

21. Treshchevskaya E.I., Tihonova E.N., Golyadkina I.V., Treshchevskaya S.V., YAKimov N.I. Dinamika estestvennogo zarastaniya travyanistoj rastitel'nost'yu nasazhdenij sosny obyknovenoj (*Pinus sylvestris* L.) pri rekul'tivacii gidrootvala Kurskoj magnitnoj anomalii. [Dynamics of grass natural overgrowth in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands during reclamation of hydrodump of the Kursk magnetic anomaly]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal]. 2023; 13. 3 (51): 117-130. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/9>.

22. Bun'kova N.P., Zalesov S.V., Zalesova E.S., Magasumova A.G., Osipenko R.A. Osnovy fitomonitoringa: ucheb. posobie; izd. 3-e, dopolnennoe i pererabotannoe. [Base phytomonitoring: training manual; 3rd edition, expanded and revised]. Ekaterinburg, USFEU Publ. 2020: 90. ISBN 978-5-94984-727-5. (In Russ.). URL: <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/9766> (дата обращения: 24.02.2024).

23. Nagimov Z.Ya. Lysov L.A., Korostelev I.F., Sokolov S.V., Solov'ev V.M., Fimushin B.S., Shevelina I.V., Anchugova G.V. Normativno-spravochnye materialy po taksacii lesov Urala: uchebnoe posobie. [Regulatory and reference materials on forest inventory in the Urals: training manual]. Ekaterinburg, USFEU Publ. 2002: 160. ISBN 5-230-25721-0. (In Russ.). URL: <https://e.twirpx.link/file/2410257/>

24. Zagreev V.V., Suhih V.I., SHvidenko A.Z., Gusev H.H., Moshkalev A.G. Obshchesoyuznye normativy dlya taksacii lesov. [All-Union Norms for Forest Taxation]. M.: Kolos. 1992: 495. ISBN 5-10-001344-3. (In Russ.). URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/taksac/index.htm>

25. Zalesov S.V., Zaripov Yu.V., Osipenko R.A. Opyt lesohozyajstvennogo napravleniya rekul'tivacii narushennyh zemel' pri razrabotke mestorozhdenij gliny, hrizotil-asbesta i redkozemel'nyh rud. [Experience in the forestry direction of recultivation of disturbed lands during the development of clay, chrysotile-asbestos and rare earth ores]. Ekaterinburg, USFEU Publ. 2022: 282. ISBN 978-5-94984-834-0. (In Russ.).

26. Ortega R., Domene M.A., Soriano M., Sánchez-Marañón M., Asensio C., Miralles I. Improving the fertility of degraded soils from a limestone quarry with organic and inorganic amendments to support vegetation restoration with semiarid Mediterranean plants. Soil and Tillage Research. 2020; 204: 104718. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104718>.

27. Massante J.C., Castro A.F., Sarmiento P.S.M., Silva G.M., Caldeira C.F., Ramos S., Gastauer M. Species selection for optimizing mine land rehabilitation: Integrating functional traits with the minimum set prioritization technique. Ecological Engineering. 2023; 194: 107039. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107039>.

28. Galdin R.E., Alejnikova N.V., YArmosh T.S. Formirovanie rekreacionnyh zon putem ispol'zovaniya narushennyh gorodskih zemel'. [Formation of recreational areas by using disturbed urban lands]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. [Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhov]. 2021; (12): 73-83. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-6-12-73-83>.

29. Kurowska E.E., Czerniak A., Bańkowski J. The Rationale for Restoration of Abandoned Quarries in Forests of the Ślęza Massif (Poland) in the Context of Sustainable Tourism and Forest Environment Protection. Forests. 2023; 14 (7): 1386. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14071386>.

### Сведения об авторах

*Осипенко Регина Александровна* – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры лесоводства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3359-3079>, e-mail: [osipenkora@m.usfeu.ru](mailto:osipenkora@m.usfeu.ru).

✉ *Осипенко Алексей Евгеньевич* – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры лесоводства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6148-1747>, e-mail: [osipenkoae@m.usfeu.ru](mailto:osipenkoae@m.usfeu.ru).

*Ушакова Наталья Михайловна* – инженер лесного хозяйства, ООО «Тура-лес», ул. Лесная, 3, г. Верхняя Тура, Российская Федерация, 624320, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2960-3699>, e-mail: [ushakova-18@list.ru](mailto:ushakova-18@list.ru).

*Новожилов Андрей Сергеевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7147-1180>, e-mail: [novozhilov-nnsaa@yandex.ru](mailto:novozhilov-nnsaa@yandex.ru).

### Information about the authors

*Regina A. Osipenko* – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor of Department of Forestry, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3359-3079>, e-mail: [osipenkora@m.usfeu.ru](mailto:osipenkora@m.usfeu.ru).

✉ *Aleksey E. Osipenko* – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor of Department of Forestry, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6148-1747>, e-mail: [osipenkoae@m.usfeu.ru](mailto:osipenkoae@m.usfeu.ru).

*Natalia M. Ushakova* – forestry engineer, LLC "Tura-Les", Lesnaya str., 3, Verkhnyaya Tura, Russian Federation, 624320, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2960-3699>, e-mail: [ushakova-18@list.ru](mailto:ushakova-18@list.ru).

*Andrey S. Novozhilov* – master student, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7147-1180>, e-mail: [novozhilov-nnsaa@yandex.ru](mailto:novozhilov-nnsaa@yandex.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/6>

УДК 630\*181.311.3



## Межвидовая гибридизация орехов рода *Juglans* в Воронежской области

Василий А. Славский ✉, [slavskiyva@yandex.ru](mailto:slavskiyva@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-6579-0344>

Галина И. Славская, [galinas2401@mail.ru](mailto:galinas2401@mail.ru)  <https://orcid.org/0009-0000-2784-9133>

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

Расширение ассортимента древесных пород, пригодных для различных целей лесовыращивания, должно осуществляться за счет выведения и отбора новых форм и гибридов, обладающих не только высокой устойчивостью, но и проявляющих гетерозисные качества, не свойственные местным породам. Следовательно, для полноценного культивирования растений рода *Juglans* в Воронежской области необходимо развитие методов селекции, включая гибридизацию. Основной целью работы является изучение межвидовых гибридов орехов рода *Juglans* и оценка их адаптивных, соматических и репродуктивных свойств для выявления и отбора устойчивых, высокоурожайных, адаптивных форм, с плодами заданного качества. Авторами проведена межвидовая гибридизация путем контролируемого опыления лучших форм ореха грецкого *J. regia* (L.), ореха маньчжурского *J. manshurica* (Max.), ореха черного *J. nigra* (L.) и ореха серого *J. cinerea* (L.), используемых в качестве опылителей, а также ореха сердцевидного *J. cordiformis* (Max.), используемого в качестве материнского растения. Из полученных межвидовых гибридов создан экспериментальный объект, на котором проводились наблюдения в течении 12 лет. При оценке гибридов на силу и энергию роста выявлен истинный соматический гетерозис у гибридов *J. cordiformis* × *J. cinerea*, которые в возрасте 10 лет превосходят по росту оба родительских вида в среднем на 30 %, что подтверждается статистически значимой достоверностью различий между значениями сравниваемых показателей (при уровне вероятности 0,95) –  $t=4,08$  (орех серый) и  $6,78$  (орех сердцевидный). Данный гибридный вариант также обладает высоким адаптивным потенциалом (АП = 3,12), что позволяет полноценно конкурировать с аборигенными породами. Гибридов, имеющих плоды приемлемого качества, и при этом обладающих высоким адаптивным потенциалом, не выявлено. На основании полученных результатов, гибридные формы *J. cordiformis* × *J. cinerea* могут быть включены в расширенный ассортимент древесных пород, пригодных для создания лесных культур и защитного лесоразведения на территории Воронежской области.

**Ключевые слова:** селекция, гибридизация, орехи рода *Juglans*, гетерозис.

**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:** Славский, В. А. Межвидовая гибридизация орехов рода *Juglans* в Воронежской области / В. А. Славский, Г. И. Славская // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 88–102. – Библиогр.: с. 99–102 (20 назв.) – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/6>.


Поступила 22.01.2024. Пересмотрена 05.03.2024. Принята 15.03.2024. Опубликовано онлайн 17.06.2024.



## Article

### Interspecific hybridization of nuts of the genus *Juglans* in the Voronezh region

Vasily A. Slavskiy ✉, slavskiyva@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6579-0344>

Galina Iv. Slavskaya, galinas2401@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2973-7447>

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

#### Abstract

The expanding the range of tree species suitable for various forest growing purposes should be carried out through the breeding and selection of new forms and hybrids that are not only highly resistant, but also exhibit heterotic qualities that are not characteristic of local species. Consequently, for the full cultivation of plants of the genus *Juglans* in the Voronezh region, it is necessary to develop selection methods, including hybridization. The main goal of the work is to study interspecific hybrids of nuts of the genus *Juglans* and evaluate their adaptive, somatic and reproductive properties to identify and select stable, high-yielding, adaptive forms with fruits of a given quality. The authors carried out interspecific hybridization by artificial pollination of the best forms of walnut – *J. regia* (L.), Manchurian walnut – *J. manshurica* (Max.), black walnut – *J. nigra* (L.) and gray walnut – *J. cinerea* (L.), used as pollinators, as well as the heartnut – *J. cordiformis* (Max.), used as a mother plant. From the resulting interspecific hybrids, an experimental object was created, on which observations were carried out for 12 years. When assessing hybrids for vigor and growth energy, true somatic heterosis was revealed in hybrids *J. cordiformis* × *J. cinerea*, which at the age of 10 years outgrow both parental species by an average of 30%. This is confirmed by statistically significant differences between the values of the compared indicators (at a probability level of 0.95) –  $t = 4.08$  (gray walnut) and 6.78 (heartnut). The hybrid variant also has a high adaptive potential ( $AP = 3.12$ ), which allows it to fully compete with native breeds. No have been identified hybrids that have fruits of acceptable quality and at the same time have high adaptive potential. Based on the results obtained, hybrid forms of *J. cordiformis* × *J. cinerea* may be included in the expanded range of tree species suitable for creating forest crops and protective afforestation in the Voronezh region.

**Keywords:** *breeding, hybridization, nuts of the genus Juglans, heterosis*

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

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

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

**For citation:** Slavskiy V. A., Slavskaya G. Iv. (2024). Interspecific hybridization of nuts of the genus *Juglans* in the Voronezh region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 88-102 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/6>.

*Received* 22.01.2024 *Revised* 05.03.2024. *Accepted* 15.03.2024. *Published online* 17.06.2024.

## Введение

Изучаемые в работе орехи рода *Juglans* по совокупности полезных свойств считаются одними из самых ценных растений планеты [1, 2], что подтверждено в работах ряда авторов, занимающихся вопросами ореховодства [3-5]. Главным подтверждением этого является постоянное увеличение площадей, на которых выращиваются орехи [6, 7].

В связи с лимитирующими климатическими условиями, для полноценного культивирования орехов рода *Juglans* в Воронежской области необходимо проведение селекции различными методами, включая гибридизацию [8]. Гибридизация – процесс, в основе которого лежит объединение генетического материала, содержащегося в разных клетках [9]. Основной целью проведения межвидовой гибридизации орехов рода *Juglans* является получение устойчивых, высокоурожайных, адаптивных форм, с плодами заданного качества.

Однако не все виды орехов имеют склонность к гибридизации, и легкость процесса гибридизации может значительно различаться даже между близкородственными видами [10]. Существуют также генотипические различия внутри видов, которые влияют на успех или неудачу межвидовой гибридизации [8, 11]. Тем не менее, имеется ряд работ, подтверждающих успешность межвидовой гибридизации орехоплодных пород искусственным способом [11-13].

Впервые, в Воронежской области опыты по межвидовой гибридизации орехов проводились в начале 70-х годов прошлого века. М.М. Вересин и М.К. Улюкина<sup>6</sup> создали гибриды *J. regia* × *J. manshurica*, отличающиеся повышенной зимостойкостью и обладающие приемлемым качеством плодов. В дальнейшем, масштабных работ по межвидовой гибридизации в Воронежской области не проводилось. Таким образом, данный вопрос в исследуемом регионе изучен в недостаточном объеме, а новые данные не были получены в течение полувека, что особенно актуально в связи с наметившейся тенденцией глобального потепления.

<sup>6</sup> Вересин М. М., Селекция и гибридизация грецкого ореха на зимостойкость / М. М. Вересин, М. К. Улюкина // Лесная генетика, селекция и семеноводство (Петрозаводск), 1970. – С. 365-369.

Гибридизация является перспективным и широко востребованным направлением в мировой селекционной практике, что отмечается в работах ведущих ученых по всему миру [13, 14 и др.].

При скрещивании видов орехов рода *Juglans* может быть достигнуто сочетание признаков крупного ядра с высокой адаптивностью и устойчивостью к неблагоприятным факторам. Следовательно, при гибридизации необходимо найти оптимальное сочетание лучших наследственных свойств у гибридных форм, обладающих соматическим, адаптивным или репродуктивным гетерозисом.

Целью работы является изучение межвидовых гибридов орехов рода *Juglans* и оценка их адаптивных, соматических и репродуктивных свойств для выявления и отбора устойчивых, высокоурожайных, адаптивных форм, с плодами заданного качества.

## Материалы и методы

Сложности, возникающие при проведении межвидовой гибридизации, обычно подразделяются на две категории: барьеры, которые препятствуют образованию гибридного эмбриона на стадии оплодотворения и барьеры после оплодотворения, которые снижают жизнеспособность формирующихся гибридных эмбрионов [9]. В связи с этим, крайне важно уделить повышенное внимание методическим подходам при подготовке экспериментального материала.

### Предмет и объект исследования

Экспериментальная работа проводилась на протяжении 12 лет. Для гибридизации отобраны лучшие по фенотипическим признакам формы видов орехов, произрастающие в оптимальных почвенных условиях. Лесоводственно-таксационные характеристики исходных форм видов орехов (зафиксированные на момент начала исследования) приведены в табл. 1.

Измерение лесоводственно-таксационных показателей проводилось по утвержденным методикам, в соответствии с действующими инструкциями и рекомендациями<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Приказ МПР РФ от 5 августа 2022 года № 510 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции». URL: <https://docs.cntd.ru/document/351878696?ysclid=lm9ew816i204569898>

Тип лесорастительных условий (ТЛУ) определен по шкале П.С. Погребняка [15].

В качестве материнского дерева использован орех сердцевидный (*J. cordiformis* Max.). Этот вид рода *Juglans* обладает повышенной устойчивостью к болезням и вредителям в Воронежской области, а также высокой урожайностью, приемлемым качеством плодов и наибольшим количеством женских

цветков в кисти [16, 17]. В качестве отцовских видов использованы орехи серый (*J. cinerea* L.), маньчжурский (*J. manshurica* Max.) и черный (*J. nigra* L.), поскольку они имеют высокий показатель комплексной устойчивости [16], а также орех грецкий (*J. regia* L.) – как вид, обладающий плодами наилучшего качества [17].

Таблица 1

Основные лесоводственно-таксационные характеристики форм, используемых при гибридизации

Table 1

Main silvicultural and taxation characteristics of forms used in hybridization

Виды орехов рода <i>Juglans</i> , используемые для гибридизации   Nut species of the genus <i>Juglans</i> , used for hybridization	Лесоводственно-таксационные показатели отобранных растений   Silvicultural and taxation indicators of plantations				
	Диаметр ствола (1,3 м), см   Trunk diameter (1.3 m), cm	Высота, м   Height, m	Диаметр кроны, м   Crown diameter, m	Возраст, лет   Age, years	ТЛУ   Forest site type
<i>J. cordiformis</i> ♀	38-48	13.0-13.8	6.0-7.0	40-50	C <sub>2</sub> D / D <sub>2</sub>
<i>J. regia</i> ♂	36-44	11.4-13.6	5.0-6.5	35-45	D <sub>2</sub>
<i>J. cinerea</i> ♂	32-44	13.1-15.2	4.0-4.5	45-50	D <sub>2</sub>
<i>J. nigra</i> ♂	38-52	15.5-19.5	4.0-5.5	40-70	D <sub>2</sub>
<i>J. manshurica</i> ♂	32-48	14.1-15.4	3.5-5.5	35-55	C <sub>2</sub> D/ D <sub>2</sub>

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

### Сбор данных

При подготовке к гибридизации у материнского растения заблаговременно проводилось удаление мужских соцветий механическим способом, чтобы не допустить самоопыления. Во избежание случайного неконтролируемого опыления женских цветков с близрастущих деревьев, произведена их изоляция. В качестве изолятора использовалась 4-слойная марлевая повязка, которая закреплялась у основания соцветия. После начала цветения, на рыльца пестиков в умеренном количестве наносилась пыльца отцовских видов орехов (собранная заранее, т.к. цветение ореха сердцевидного наступает на несколько дней позже).

При проведении контролируемого опыления фиксировали количество женских цветков для расчета завязываемости плодов. В последующие 2 года данный эксперимент был повторен. Всего было искусственно опылено и изолировано более 1500 пестичных цветков.

Осенью этого же года образовавшиеся гибридные плоды высевались на питомнике с целью изучения всхожести семян и сохранности выращенных сеянцев гибридов орехов рода *Juglans*. В возрасте 2 лет сеянцы были пересажены на экспериментальный объект (коллекционно-испытательную плантацию). Созданный экспериментальный объект площадью 0,6 га, размещен на территории Пригородного лесничества Воронежской области (схема расположения приведена на рис. 1, а); географические координаты объекта: 51°53'37.1"N, 39°13'28.2"E.

Кроме гибридных сеянцев на экспериментальном авторском объекте выращены сеянцы орехов грецкого, черного, маньчжурского и серого аналогичного возраста, изучаемые показатели которых использованы в качестве контроля.

Гибридизация орехов рода *Juglans* является сложным процессом, требующим многократного проведения экспериментальных работ [4, 6]. В связи с этим, зачастую приходится выдвигать гипотезы и

прогнозировать выявление гетерозисных свойств, используя достаточно ограниченный объем выборки.

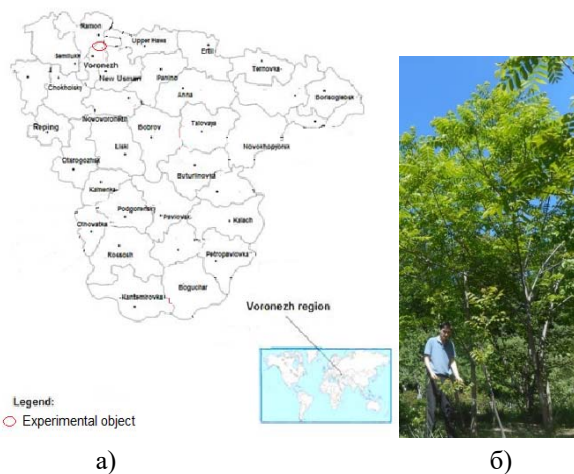


Рисунок 1. Коллекционно-испытательная плантация видов орехов рода *Juglans* и их гибридов  
 а) территориальное месторасположение участка;  
 б) внешний вид гибридов орехов рода *Juglans*  
 Figure 1. Collection and testing plantation of nut species of the genus *Juglans* and their hybrids  
 а) the territorial location of the site; б) appearance of hybrids of nuts of the genus *Juglans*

Источник: собственная композиция авторов  
 Source: author's composition

## Анализ данных

Расчет адаптивного потенциала форм и гибридов орехов произведен с учетом их перспективности, определяемой по методике определения перспективности интродукции древесных растений Главного ботанического сада [18], апробированной нами на формах ореха грецкого [16], комплексной устойчивости к неблагоприятным факторам окружающей среды, определяемой в лабораторных условиях экспресс-методом [1] и санитарного состояния растений, оценка которого производилась согласно требованиям, указанным в Правилах санитарной безопасности в лесах<sup>8</sup>. На основе интегральной оценки комплекса показателей рассчитан общий адаптивный потенциал [16].

<sup>8</sup> Постановление Правительства Российской Федерации от 2020 года № 2047. Правила санитарной безопасности в лесах. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573053313>

<sup>9</sup> STATISTICA version 13.0-StatSoft. (2021). <http://statsoft.ru/resources/support/new-features-statistica-13>.

При оценке качества плодов за основу взята обобщенная система определения категорий хозяйственной ценности плодов видов орехов, разработанная для исследуемого региона [17]. Для каждого вида орехов определены коэффициенты значимости оценочных критериев, с учетом биологических особенностей породы и уровня изменчивости признаков. При общей оценке качества плодов учитывались вкусовые качества, размер, одномерность и масса плодов, легкость выделения, выполненность и выход ядра, характер поверхности, цвет, твердость и толщина скорлупы, а также толщина шва и перегородок.

Статистическая обработка выполнена по методике Б.А. Доспехова [19], с использованием статистических программ STATISTICA-13.0<sup>9</sup> [20] и Microsoft Office Excel 2007-2016 for Windows. Доверительный интервал рассчитан на уровне значимости 0.95. Проведена статистическая обработка экспериментального материала с использованием методов дисперсионного анализа и расчетов достоверностей различий, выявленных между значениями средних показателей.

Подлинность межвидовых гибридов определялась по методике В.Г. Картелева<sup>10</sup>. Методика используется в селекции орехоплодных пород, для изучения вопросов наследования и проведения разноцелевых экспертиз. Оценка гибридов и отбор наиболее ценных из них проводился в возрасте 10-11 лет, когда все они вступили в стадию плодоношения. Для сравнения (контроля) изучены формы видов орехов рода *Juglans* аналогичного возраста.

## Результаты и обсуждение

В ходе проведения исследований были осуществлены 4 варианта скрещиваний: ♀орех сердцевидный × ♂орех серый (далее *J. cordiformis* × *J. cinerea*), ♀орех сердцевидный × ♂орех грецкий (*J. cordiformis* × *J. regia*), ♀орех сердцевидный × ♂орех маньчжурский (*J. cordiformis* × *J. manshurica*), ♀орех сердцевидный × ♂орех черный (*J. cordiformis* × *J. nigra*).

<sup>10</sup> Картеlev В.Г. Способ идентификации сортов грецкого ореха. Основание СССР. Номер патента: 1800944 (03 июля 1993 г.). URL: <https://patents.su/3-1800944-sposob-identifikacii-sortov-greckogo-orekha.html>.

Завязываемость плодов, полученная при искусственном опылении, всхожесть семян и высота однолетних сеянцев приведены в табл. 2.

Таблица 2

Среднестатистические показатели семян и сеянцев межвидовых гибридов F1 орехов рода *Juglans*

Table 2

Average statistical indicators of seeds and seedlings of interspecific hybrids F1 of nuts of the genus *Juglans*

Межвидовые скрещивания   Interspecific crossbreeding	Завязываемость плодов, %   Fruit set, %	Всхожесть семян, %   Seed germination, %	Высота сеянцев в 1-й год   Height of seedlings in the 1st year		Кол-во изучаемых растений, шт.
			M <sup>a</sup> ±m <sup>b</sup> (см)*	C <sup>c</sup> (%)*	
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. cinerea</i>	9.8±0.38	52±1.69	41±1.54	16.5	26
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. regia</i>	6.9±0.29	55±1.77	28±1.23	17.4	19
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. manshurica</i>	6.3±0.21	33±1.25	37±1.59	16.7	18
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. nigra</i>	3.1±0.24	38±1.34	31±3.52	18.6	9

\*<sup>a</sup>M – среднее значение признака; <sup>b</sup>m – ошибка среднего значения; <sup>c</sup>C – коэффициент изменчивости.

\*<sup>a</sup>M – average value of the characteristic; <sup>b</sup>m – error of mean; <sup>c</sup>C – coefficient of variability.

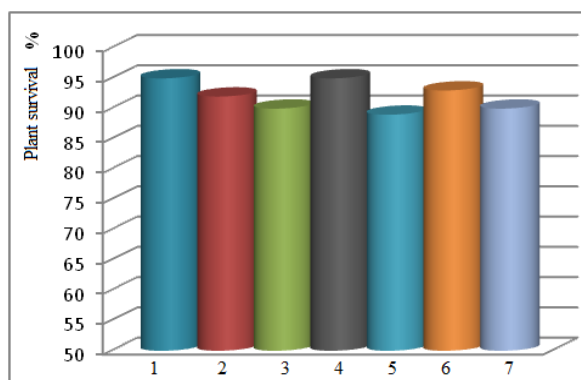
Источник: собственные измерения и вычисления авторов

Source: own measurements and calculations

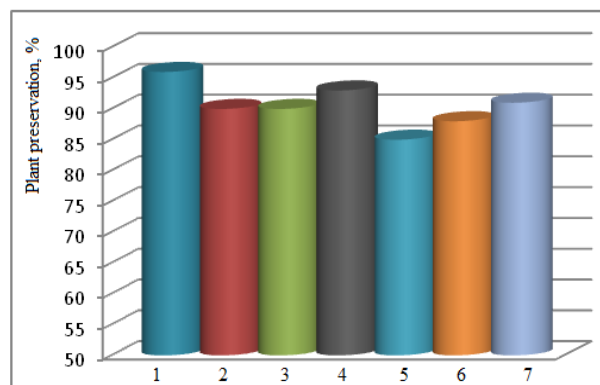
Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что завязываемость плодов при межвидовой гибридизации орехов рода *Juglans* невысокая и в среднем составляет около 6.5 %. У гибридного варианта орех сердцевидный × орех черный отмечена самая низкая завязываемость плодов – 3.1 % и невысокая всхожесть семян – 38%. Эти факторы не позволили получить статистически достоверную выборку, в связи с чем, данный гибридный вариант исключен из дальнейшего анализа. Сеянцы гибридов *J. cordiformis* ×

*J. cinerea* сразу проявляют повышенную энергию роста – в однолетнем возрасте их средняя высота составляет 41 см.

Двухлетние сеянцы гибридов и видов орехов были пересажены из питомника на постоянное место произрастания – на территорию экспериментального объекта. Результаты приживаемости и сохранности сеянцев (на третий год после посадки) приведены на рис. 2.



а)



б)

Рисунок 2. Приживаемость (а) и сохранность (б) сеянцев видов орехов рода *Juglans* и их межвидовых гибридов  
Figure 2. Survival (a) and preservation (b) of seedlings of walnut species of the genus *Juglans* and interspecific hybrids

Условные обозначения: / Legend: 1 – *J. cordiformis* × *J. cinerea*, 2 – *J. cordiformis* × *J. regia*,  
3 – *J. cordiformis* × *J. manshurica*, 4 – *J. cinerea*, 5 – *J. regia*, 6 – *J. manshurica*, 7 – *J. cordiformis*

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Следует отметить, что приживаемость сеянцев гибридов и видов орехов рода *Juglans* отличается между собой несущественно, а выявленные различия находятся в пределах статистической погрешности. Наилучшая сохранность (на третий год после пересадки) отмечена у гибридов *J. cordiformis* × *J. cinerea* (более 96 %), что несколько выше, чем у обоих родительских видов.

Для достоверного выявления повышенных адаптивных свойств (в т.ч. адаптивного гетерозиса) у гибридов F1 определяли их состояние, комплексную устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды и оценивали перспективность (успешность) выращивания. Интегральное значение этих признаков позволяет определить адаптивный потенциал растений.

Для любой древесной породы (в особенности интродуцированной в культуру севернее условий естественного ареала), большое значение имеет комплексная устойчивость к неблагоприятным факторам, которым в различной степени ежегодно подвер-

гаются растения, а также их способность к восстановлению. Чем выше данный показатель, тем большей устойчивостью обладает рассматриваемая культура (табл. 3).

Выявлено усиление адаптивного потенциала у гибридов *J. cordiformis* × *J. cinerea*. При этом один из родительских видов (орех серый), как правило, не проявляет повышенных адаптивных свойств.

Суммарная оценка состояния, комплексной устойчивости и перспективности выращивания позволяет с уверенностью говорить о высокой адаптивной способности гибридов. Это позволяет рекомендовать изучаемые гибриды (в первую очередь *J. cordiformis* × *J. cinerea*) для опытно-производственной проверки, с целью их включения в перечень древесных пород, используемых для создания лесных культур в Воронежской области. Средние значения состояния у всех изучаемых видов орехов и их гибридов в возрасте 10 лет отличаются незначительно. Средние статистические показатели адаптивных свойств гибридов (балл) приведены на рис. 3.

Таблица 3

Оценка общего адаптивного потенциала видов орехов рода *Juglans* и их межвидовых гибридов

Table 3

Evaluation of general adaptive potential of nut species of the genus *Juglans* and their interspecific hybrids

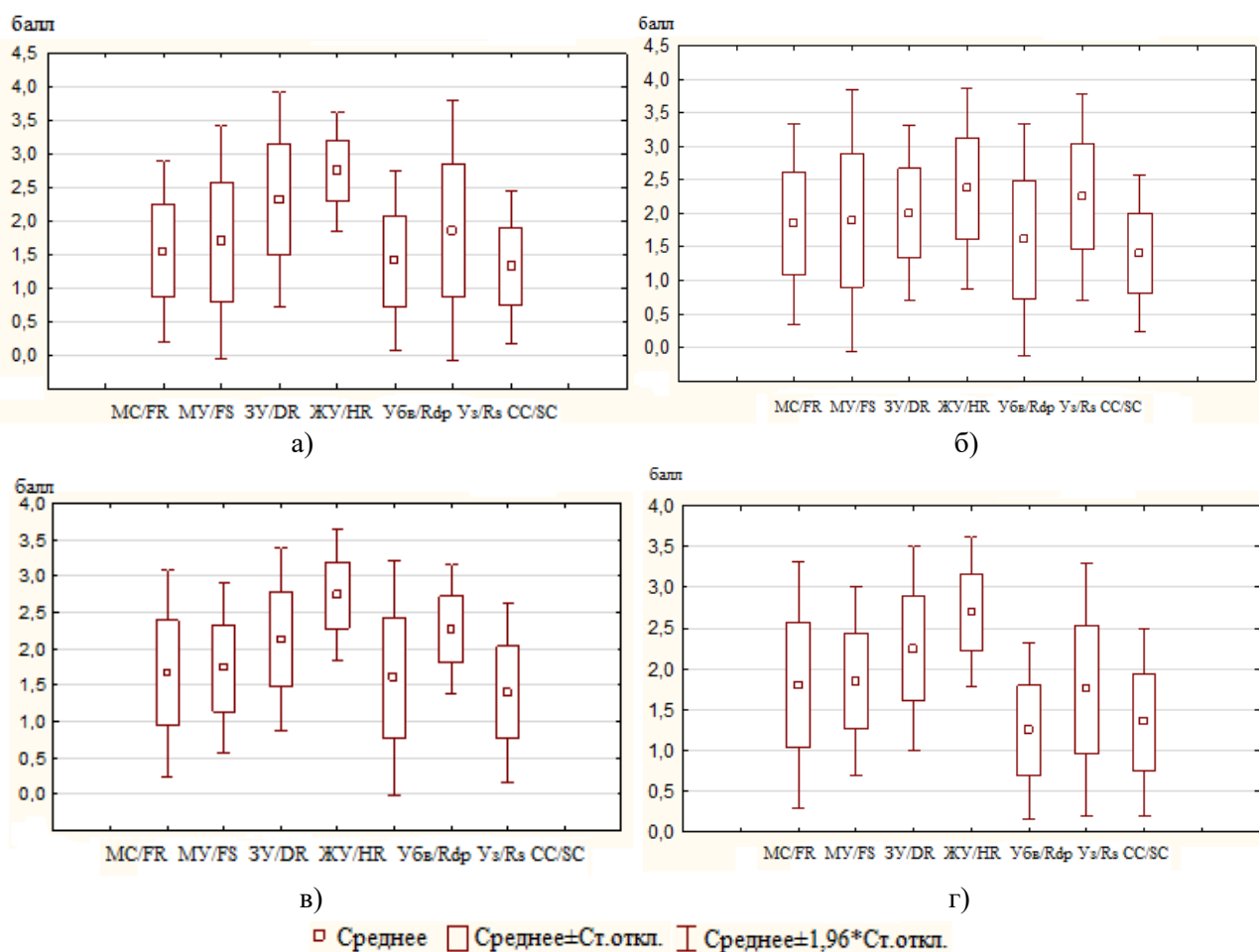
Виды и гибриды орехов рода <i>Juglans</i>   Species and hybrids nuts of the genus <i>Juglans</i>	Оценочный критерий, средний балл   Evaluation criterion, average score									
	MC <sup>a</sup>   FR <sup>a</sup>	MY <sup>b</sup>   FS <sup>b</sup>	ZY <sup>c</sup>   DR <sup>c</sup>	JY <sup>d</sup>   HR <sup>d</sup>	YBv <sup>e</sup>   Rdp <sup>e</sup>	Yzam <sup>f</sup>   Rs-a <sup>f</sup>	CC <sup>g</sup>   SC <sup>g</sup>	KY <sup>h</sup>   IS <sup>h</sup>	AP <sup>i</sup>   AP <sup>i</sup>	
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. cinerea</i>	1.55	1.62	2.32	2.74	1.39	1.86	1.32	3.03	3.12	
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. regia</i>	1.82	1.85	1.99	2.35	1.59	2.26	1.38	2.61	2.67	
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. manshurica</i>	1.68	1.76	2.15	2.76	1.56	2.21	1.41	2.70	2.72	
<i>J. regia</i>	1.90	2.12	1.61	1.97	1.88	2.68	1.42	2.18	2.20	
<i>J. manshurica</i>	1.51	1.56	2.35	2.82	1.56	2.33	1.37	2.37	2.44	
<i>J. cinerea</i>	1.52	1.58	2.40	2.82	1.74	2.06	1.36	2.74	2.81	
<i>J. cordiformis</i>	1.79	1.83	2.28	2.70	1.25	1.75	1.33	2.92	3.00	

Условные обозначения: <sup>a</sup>MC – Морозостойкость; <sup>b</sup>MY – Морозоустойчивость; <sup>c</sup>ZY – Засухоустойчивость; <sup>d</sup>JY – Жароустойчивость; <sup>e</sup>YBv – Устойчивость к болезням и вредителям; <sup>f</sup>Yzam – Устойчивость к поздним весенним и ранним осенним заморозкам; <sup>g</sup>CC – Санитарное состояние; <sup>h</sup>KY – Комплексная устойчивость; <sup>i</sup>AP – общий адаптивный потенциал.

Legend: <sup>a</sup>FR – Frost resistance; <sup>b</sup>FS – Frost stability; <sup>c</sup>DR – Drought resistance; <sup>d</sup>HR – Heat resistance; <sup>e</sup>Rdp – Resistance to diseases and pests; <sup>f</sup>Rs-a – Resistance to late spring and early autumn frosts; <sup>g</sup>SC – Sanitary condition; <sup>h</sup>IS – Integrated sustainability; <sup>i</sup>AP – General Adaptive Potential.

Источник: собственные измерения и вычисления авторов

Source: own measurements and calculations



(a) *J. cordiformis* × *J. cinerea*; (b) *J. cordiformis* × *J. regia*; (в) *J. cordiformis* × *J. manshurica*; (г) *J. cordiformis*

Рисунок 3. Оценочные показатели адаптивных свойств гибридов (балл)

Figure 3. Estimated indicators of adaptive properties of hybrids (score)

Условные обозначения: МС – Морозостойкость; МУ – Морозоустойчивость; ЗУ – Засухоустойчивость; ЖУ – Жароустойчивость; У6в – Устойчивость к болезням и вредителям; У3ам – Устойчивость к поздним весенним и ранним осенним заморозкам; СС – Санитарное состояние

Legend: FR – Frost resistance; FS – Frost stability; DR – Drought resistance; HR – Heat resistance; Rdp – Resistance to dis-eases and pests; Rs-a – Resistance to late spring and early autumn frosts; SC – Sanitary condition

Источник: собственные измерения и вычисления авторов

Source: own measurements and calculations

При анализе данных, приведенных в табл. 3 и на рис. 3, можно сделать вывод, что большинство из изучаемых видов орехов рода *Juglans* и их гибридов способны выдержать конкуренцию с местными породами (АП более 2,5 баллов). Самыми перспективными, с точки зрения адаптивных свойств, являются гибриды *J. cordiformis* × *J. cinerea*, а также орех сердцевидный, имеющие интегральное значение адаптивного потенциала более 3 баллов.

В ряде случаев выявлена существенная достоверность различий между средними показателями общего адаптивного потенциала для отдельных видов орехов рода *Juglans* и их межвидовых гибридов. Тем не менее, адаптивных различий, гарантирующих наличие истинного гетерозиса, между гибридами F1 и родительскими видами не установлено (табл. 4).

Таблица 4

Достоверность различий между показателями адаптивного потенциала видов орехов рода *Juglans* и их гибридов

Table 4

Reliability of differences between indicators of adaptive potential of nut species of the genus *Juglans* and their hybrids

Виды и гибриды орехов рода <i>Juglans</i>   Species and hybrids nuts of the genus <i>Juglans</i>	Показатель достоверности различий между средними значениями   Indicator of reliability of differences between average values							
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	t <sub>0,05</sub>
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. cinerea</i> (M <sub>1</sub> )	–	3.58	2.66	2.29	5.11	3.28	1.42*	1.96
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. regia</i> (M <sub>2</sub> )	-3.58	–	-0.78*	-0.93*	3.23	1.54*	-2.79	1.96
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. manshurica</i> (M <sub>3</sub> )	-2.66	0.78*	–	-0.32*	2.97	1.75*	-1.69*	1.96
<i>J. cinerea</i> (M <sub>4</sub> )	-2.29	0.93*	0.32*	–	3.57	1.25*	-1.03*	1.96
<i>J. regia</i> (M <sub>5</sub> )	-5.11	-3.23	-2.97	-3.57	–	-2.26	-3.73	1.96
<i>J. manshurica</i> (M <sub>6</sub> )	-3.28	-1.54*	-1.75*	-1.25*	2.26	–	-2.47	1.96
<i>J. cordiformis</i> (M <sub>7</sub> )	-1.42*	2.79	1.69*	1.03*	3.73	2.47	–	1.96

\* несущественные различия между средними значениями

\*insignificant differences between means

Источник: собственные измерения и вычисления авторов

Source: own measurements and calculations

Из анализа данных, приведенных в табл. 4, следует, что гибридные формы не имеют значительного адаптивного превосходства, свидетельствующих о наличии адаптивного гетерозиса, по сравнению с наиболее устойчивыми формами ореха сердцевидного – различия средних значений адаптивного потенциала между ними несущественны на уровне вероятности 0,95. Более того, гибриды *J. cordiformis* × *J. regia* уступают по адаптивному потенциалу формам ореха сердцевидного.

Для выявления наличия соматического гетерозиса у изучаемых гибридов, основным оценочным признаком являлся их годичный прирост в высоту (рис. 4).

Начиная с 2-х летнего возраста, у гибридов *J. cordiformis* × *J. cinerea* отмечено превышение средних ростовых показателей относительно обоих родительских видов. По достижению 5-ти летнего возраста, у данных гибридов выявлено существенное превосходство по приросту в высоту (стабильное ежегодное превышение более чем на 30 %), что свидетельствует о наличии истинного соматического гетерозиса.

Достоверность различий между средними показателями прироста в высоту у видов орехов рода *Juglans* и их межвидовых гибридов приведена в табл. 5. Отмечены существенные различия между

показателями прироста гибридов *J. cordiformis* × *J. cinerea* и всеми остальными изучаемыми видами орехов – критерий Фишера более чем в 2 раза превышает стандартное табличное значение при уровне вероятности 0,95.

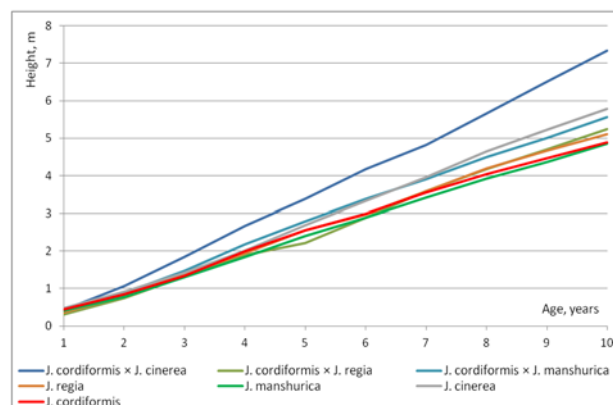


Рисунок 4. Динамика роста в высоту видов орехов и их гибридов

Figure 4. Growth dynamics in height of nut species and their hybrids

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Гибриды *J. cordiformis* × *J. manshurica* не проявили признаков соматического гетерозиса – динамика их роста и развития сопоставима с родительскими формами.



Достоверность различий между средними показателями прироста в высоту сеянцев видов орехов рода *Juglans* и межвидовых гибридов

Table 5

Reliability of differences between the growth rate of seedlings of nut species of the genus *Juglans* and interspecific hybrids

Виды орехов / гибриды   Nut species / hybrids	Показатель достоверности различий между средними значениями   Indicator of reliability of differences between average values							
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	t <sub>0,05</sub>
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. cinerea</i> (M <sub>1</sub> )	–	-5.97	-5.14	-4.08	-6.45	-6.82	-6.78	1.96
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. regia</i> (M <sub>2</sub> )	5.97	–	0.86*	1.47*	-0.39*	-0.92*	-0.88*	1.96
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. manshurica</i> (M <sub>3</sub> )	5.14	-0.86*	–	0.54*	-1.23*	-1.76*	-1.69*	1.96
<i>J. cinerea</i> (M <sub>4</sub> )	4.08	-1.47*	-0.54*	–	-1.65*	-2.35	-2.28	1.96
<i>J. regia</i> (M <sub>5</sub> )	6.45	0.39*	1.23*	1.65*	–	-0.59*	-0.51*	1.96
<i>J. manshurica</i> (M <sub>6</sub> )	6.82	0.92*	1.76*	2.35	0.59*	–	0.10*	1.96
<i>J. cordiformis</i> (M <sub>7</sub> )	6.78	0.88*	1.69*	2.28	0.54*	-0.10*	–	1.96

\* несущественные различия между средними значениями

\* insignificant differences between means

Источник: собственные измерения и вычисления авторов

Source: own measurements and calculations

Качество плодов и урожайность являются важнейшими критериями для культивирования орехов. По внешнему виду и качеству плодов гибриды *J. cordiformis* × *J. cinerea* и *J. cordiformis* × *J. regia* по большей части уклонились в менее хозяйственно-ценные виды – соответственно в орех серый и орех сердцевидный (рис. 5). Гибриды *J. cordiformis* × *J. cinerea* имели сопоставимый показатель величины урожая с орехом серым (прежде всего за счет

более крупных плодов) и менее урожайны, чем орех сердцевидный (табл. 6). Гибриды *J. cordiformis* × *J. regia* имели урожайность на порядок ниже, чем оба родительские вида. Возможно, данные гибриды задерживаются с возрастом вступления в интенсивное плодоношение. У гибридов *J. cordiformis* × *J. manshurica* в возрасте 10 лет плоды имелись в единичном количестве, в связи с чем, невозможно осуществить полноценный анализ их качества.



а)



б)

Рисунок 5. Размеры и форма плодов

Figure 5. Size and shape of fruits

а) родительских видов (1, 3) и гибридов *J. cordiformis* × *J. regia* (2); б) ореха серого (1, 2) и гибридов *J. cordiformis* × *J. cinerea* (3)

a) of parental species (1, 3) and hybrids *J. cordiformis* × *J. regia* (2); б) of gray walnut (1, 2) and hybrids *J. cordiformis* × *J. cinerea* (3)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 6

Количественные и качественные показатели плодов видов орехов рода *Juglans* (возраст 10-15 лет)

Table 6

Quantitative and qualitative indicators of fruits of nut species of the genus *Juglans* (age 10-15 years)

Виды орехов / гибриды   Nut species / hybrids	Средние показатели урожайности и качества плодов   Average indicators of yield and quality of fruits						
	кол-во уро- жая, кг   amount of harvest, kg	размеры плодов   fruit size		масса плодов   fruit weight		кол-во плодов в кисти (шт.)   quantity of fruits in a clus- ter (pcs.)	форма плодов   fruit shape
		(M), см	Cv, %	(M±m), г	Cv, %		
<i>J. regia</i>	7-12	3,3×2,9×3,0	18.8	9.15±0.094	22.4	1-3	шаровидная
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. cinerea</i>	10-13	9,3×4,4×4,5	19.1	25.94±0.211	17.5	1-2	ромбовидная остро- клиновидная
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. regia</i>	3-6	3,4×2,9×3,3	20.3	9.76±0.102	20.9	2-8	остроконечная яйцевидная
<i>J. cinerea</i>	12-15	7,4×3,3×4,0	16.2	21.70±0.169	15.8	2-4	продолговатая остроклиновидная
<i>J. cordiformis</i>	15-22	2,5×2,1×2,4	6.3	5.84±0.027	9.2	5-12	широко- яйцевидная

Источник: собственные измерения и вычисления авторов

Source: own measurements and calculations

Таблица 7

Показатели качества плодов местных форм видов орехов рода *Juglans*

Table 7

Fruit quality indicators of local forms of nut species of the genus *Juglans*

Виды орехов / гибриды   Nut species / hybrids	Показатели качества плодов   Fruit quality indicators						
	извлекаемость ядра   kernel extractability		выход ядра   kernel output		толщина скорлупы   shell thickness		вкус, балл   taste, score
	(M±m), балл	Cv, %	(M±m), %	Cv, %	(M±m), %	Cv, %	
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. cinerea</i>	1.36±0.018	29.3	17.6±0.08	11.7	3.45±0.025	12.6	3.11
<i>J. cordiformis</i> × <i>J. regia</i>	2.77±0.045	23.5	32.2±0.11	9.6	2.57±0.009	9.9	3.65
<i>J. cinerea</i>	1.18±0.019	32.2	15.1±0,08	10.0	3.94±0.030	15.5	2.56
<i>J. regia</i>	4.33±0.028	22.2	49.2±0.16	14.5	1.19±0.012	18.7	4.36
<i>J. cordiformis</i>	3.70±0.032	17.5	28.2±0.14	10.5	1.47±0.011	14.8	4.05

Источник: собственные измерения и вычисления авторов

Source: own measurements and calculations

Из данных, приведенных в табл. 6 и 7, следует, что гибридные варианты обладают плодами низкого качества, имеют толстую, разросшуюся скорлупу и низкую извлекаемость ядра, что не позволяет говорить о положительной селекции на качество плодов. С учетом снижения урожайности у изу-

чаемых гибридных вариантов по сравнению с родительскими видами, можно с уверенностью сказать о снижении их репродуктивной способности.

Выполненная диагностика подтвердила подлинность гибридов, поскольку получены существенные различия между гибридными и видовыми

особями в составленных идентификационных формулах, включающих в себя размеры, форму и структуру плодов, морфологию листа и рост побегов.

### Заключение

Результаты исследования показали, что виды орехов рода *Juglans* могут успешно гибридизоваться для синтеза желательных характеристик и давать жизнеспособные семена. Средняя завязываемость плодов у гибридов варьировала на уровне 6,5 %, при самом высоком показателе – 9,8 % (*J. cordiformis* × *J. cinerea*). Количество плодов в кисти у образовавшихся гибридов во всех случаях было меньше, чем у опыляемого вида – ореха сердцевидного. Всхожесть, сохранность и приживаемость у гибридов *J. cordiformis* × *J. cinerea* была незначительно выше, чем у родительских видов, что свидетельствует об их повышенном адаптивном потенциале. Тем не менее, нами не выявлено значительных различий между средними значениями ключевых адаптивных свойств (на уровне вероятности 0,95), подтверждающих наличия адаптивного гетерозиса.

При оценке гибридов на силу и энергию роста выявлено достоверное наличие соматического гетерозиса у гибридов орех сердцевидный × орех серый, которые в возрасте 10 лет перерастают оба родительских вида в среднем на 30 %. В совокупности с

усиленными адаптивными свойствами, данный гибридный вариант представляет интерес для лесоразведения в исследуемом регионе. Репродуктивного гетерозиса не выявлено – напротив, у гибридов отмечено снижение урожайности и ухудшение качества плодов.

Хотя изучаемые гибриды еще не достигли максимального развития, мы предполагаем, что выявленные гетерозисные свойства, с большой вероятностью, будут проявляться с той же интенсивностью и в дальнейшем.

На основании полученных результатов, рекомендуется проведение производственной проверки для включения изучаемых гибридов (в первую очередь *J. cordiformis* × *J. cinerea*) в перечень древесных пород, пригодных для создания лесных культур в Воронежской области с целью повышения биоразнообразия и устойчивости насаждений, а также повышения средообразующих функций лесных экосистем. Гибриды *J. cordiformis* × *J. manshurica* хотя и уступают гибридам *J. cordiformis* × *J. cinerea* по энергии роста и устойчивости к внешним неблагоприятным факторам, также должны быть направлены на опытно-производственную проверку, с целью подтверждения выявленных соматических и адаптивных особенностей, позволяющих использовать гибриды для создания искусственных лесных насаждений в исследуемом регионе.

### Список литературы

1. Славский В.А. Оценка зимостойкости видов орехов рода *Juglans* в Воронежской области. Лесотехнический журнал. 2019; 9 (1): 85-93. DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5ca1d51f157301.78715280](https://doi.org/10.12737/article_5ca1d51f157301.78715280). Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37424041>.
2. Биганова С. Г., Сухоруких Ю. И., Глинушкин А. П., Пчихачев Э. К. Разработка моделей и оценка мирового сортофонда ореха грецкого по качеству плодов. Новые технологии. 2022; 18 (4): 128-138. DOI: <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-4-128-138>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50279848>.
3. Славский В.А. Прогноз расширения границ площадей, пригодных для создания плантаций ореха грецкого в Воронежской области. Лесотехнический журнал. 2018; 6 (4): 129-136. DOI: [https://doi.org/10.12737/article\\_5c1a321c2832e4.03254814](https://doi.org/10.12737/article_5c1a321c2832e4.03254814). Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36574549>.
4. Fregapane G., Ojeda-Amador R.M., Salvador M.D. Virgin walnut (*Juglans regia* L.) oil. Fruit oils: chemistry and functionality / ed. M. Ramadan. Springer, Cham, 2019: 133-147. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12473-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12473-1_5).
5. Danh M., Vu D.C., Lei Z., Sumner L.W., Coggeshall M.V., Lin C. Identification and quantification of phytosterols in black walnut kernels. Journal of Food Composition and Analysis. 2019; 75: 61-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.09.016>.

6. Paż-Dyderska S., Jagodziński A.M., Dyderski M.K. Possible changes in spatial distribution of walnut (*Juglans regia* L.) in Europe under warming climate. Regional environmental change. 2021; 21: 18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01745-z>.
7. Hassani D., Sarikhani S., Dastjerdi R., Mahmoudi R., Soleimani A., Vahdati K. Situation and recent trends on cultivation and breeding of Persian walnut in Iran. Scientia Horticulturae. 2020; 270: 109369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109369>.
8. Brennan A. N., Uscola M., Joly R. J., Jacobs D.F. Cold and heat tolerances of hybrids for restoration of the endangered *Juglans cinerea* L. Annals of Forest Science. 2021; 78: 36. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01053-4>
9. Kaur B., Garcha K., Sandhu J., Sharma M., Dhatt A. Interspecific hybridization for transfer of hull-less seed trait from Cucurbita pepo to *C. moschata*. Scientific Reports. 2023; 13: 4627. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29935-9>.
10. Wang, Z., Kang, M., Li, J. et al. Genomic evidence for homoploid hybrid speciation between ancestors of two different genera. Nature Communications. 2022; 13: 1987. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29643-4>.
11. Khadivvia A., Montazerana A., Rezaeib M., Ebrahimic A. The pomological characterization of walnut (*J. regia* L.) to select the superior genotypes – an opportunity for genetic improvement. Scientia Horticulturae. 2019; 248: 29-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.12.054>.
12. Артюхова Л.В., Балапанов И.М., Ульяновская Е.В. Оценка восприимчивости и отбор устойчивых гибридных форм ореха грецкого к бурой пятнистости в Прикубанской зоне садоводства. Плодоводство и виноградарство юга России. 2022; 75 (3): 16-25. DOI: <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2022-3-75-16-25>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48549506>.
13. Заремук Р.Ш., Артюхова Л.В., Балапанов И.М. Селекционная оценка гибридных форм ореха грецкого. Плодоводство и виноградарство Юга России. 2020; 66 (6): 28-38. DOI: <https://doi.org/10.30679/2219-5335-2020-6-66-28-38>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44264045>.
14. Wang L., Liu P-F., Zhao H., Zhu G-P., Wuyun T-N. Comparative transcriptome analysis between interspecific hybridization (Huaren apricot ♀ × almond ♂) and intraspecific hybridization (Huaren apricot) during young fruit developmental stage. Scientia Horticulturae. 2018; 240: 397-404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.038>.
15. Мигунова Е.С. Лесная типология и ботаника. Экологическая оценка факторов природной среды. Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2020; 24 (4): 65–81. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-4-65-81>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43777372>.
16. Slavskiy V.A., Vodolazhsky A.N., Biganova S.G. A comprehensive assessment of the sustainability of nuts of the genus *Juglans* on adaptive features in the Voronezh region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019; 226: 012016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012016>.
17. 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. 2019; 392: 012007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012007>.
18. Соловьева М.В., Залесов С.В., Залесова Е.С., Крекова Я.А., Оплетаяев А.С. Перспективность сортов ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) для озеленения северных городов. Вестник БГСХА им. В.П. Филиппова. 2019; 2 (55): 121-129. DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2019.55.2.017>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38228459>.
19. Slavskiy V., Litovchenko D., Matveev S., Sheshnitsan S., Larionov M. 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. Land. 2023; 12: 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12010103>.
20. Шевелина И. В., Нуриев Д. Н. Статистическая обработка лесоводственно-таксационной информации в среде *Statistica*. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022: 112. ISBN 978-5-94984-840-1. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777>.

## References

1. Slavskiy V.A. *Ocenka zimostoykosti vidov orekhov roda Juglans v Voronezhskoy oblasti* [Assessment of winter hardiness of nut species of the genus Juglans in the Voronezh region] / *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*. – 2019. - № 1 (33). – S. 85-93. DOI: 10.12737/article\_5ca1d51f157301.78715280 (in Russian).
2. Biganova S. G., Sukhorukikh Yu. I., Glinushkin A. P., Pchikhachev E. K. *Razrabotka modeley i ocenka mirovogo sortofonda orekha gretskogo po kachestvu plodov* [Development of models and assessment of the world walnut variety fund based on fruit quality] *Noviye tekhnologii [New technologies]*. – 2022. – Т. 18, № 4. – S. 128-138. doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-4-128-138 (in Russian).
3. Slavskiy V.A. *Prognoz rasshireniya granits ploshchadey, prigodnykh dlya sozdaniya plantatsii orekha gretskogo v Voronezhskoy oblasti* [Forecast for expanding the boundaries of areas suitable for creating walnut plantations in the Voronezh region] / *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*. – 2018. - № 4 (32). – S. 129-136. DOI: 10.12737/article\_5c1a321c2832e4.03254814 (in Russian).
4. Fregapane G., Ojeda-Amador R.M., Salvador M.D. Virgin walnut (*Juglans regia* L.) oil // *Fruit oils: chemistry and functionality* / ed. M. Ramadan. Springer, Cham, 2019. – P. 133-147. DOI: 10.1007/978-3-030-12473-1\_5
5. Danh M., Vu D. C., Lei Z., Sumner L. W., Coggeshall M. V., Lin C. Identification and quantification of phytoosterols in black walnut kernels. *J. of Food Compos. Analys.* 2019, 75 61 <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.09.016>
6. Paż-Dyderska S., Jagodziński A.M., Dyderski M.K. Possible changes in spatial distribution of walnut (*Juglans regia* L.) in Europe under warming climate. *Regional environmental change*. V.21. - №:1. – 2021. DOI: 10.1007/s10113-020-01745-z
7. Hassani D., Sarikhani S., Dastjerdi R., Mahmoudi R., Soleimani A., Vahdati K. Situation and recent trends on cultivation and breeding of Persian walnut in Iran / *Scientia Horticulturae*. 2020, 270 109369 <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109369>
8. Brennan A. N., Uscola M., Joly R. J., Jacobs D.F. Cold and heat tolerances of hybrids for restoration of the endangered *Juglans cinerea* L. *Annals of Forest Science* (2021) 78: 36 <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01053-4>
9. Kaur B., Garcha K., Sandhu J., Sharma M., Dhath A. Interspecific hybridization for transfer of hull-less seed trait from *Cucurbita pepo* to *C. moschata*. *Scientific Reports*. No 13. - 2023, 4627. DOI: 10.1038/s41598-023-29935-9
10. Genomic evidence for homoploid hybrid speciation between ancestors of two different genera. Z. Wang [et all.] *Nature Communications*. Vol. 13, Article number: 1987 (2022). DOI: 10.1038/s41467-022-29643-4
11. Khadivvia A., Montazerana A., Rezaeib M., Ebrahimic A. The pomological characterization of walnut (*J. regia* L.) to select the superior genotypes – An opportunity for genetic improvement. *Scientia Horticulturae*. – 2019, 248. – p. 29-33. doi.org/10.1016/j.scienta.2018.12.054
12. Artyukhova L.V., Balapanov I.M., Ulyanovskaya E.V. *Otsenka vospriimchivosti i otbor ustoychivyykh gibridnykh form orekha gretskogo k buroy pyatnistosti v Prikubanskoy zone sadovodstva* [Assessment of susceptibility and selection of resistant hybrid forms of walnut to brown spot in the Kuban horticultural zone]. *Plodovodstvo i vinogradarstvo yuga Rossii [Fruit growing and viticulture in the south of Russia]*. No: 75 (3) – 2022. – pp. 16-25. DOI: 10.30679/2219-5335-2022-3-75-16-25 (in Russian).
13. Zaremuk R.SH., Artyukhova L.V., Balapanov I.M. *Selektsionnaya ocenka gibridnykh form orekha gretsko-go* [Breeding assessment of hybrid forms of walnut]. *Plodovodstvo i vinogradarstvo Yuga Rossii [Fruit growing and viticulture of the South of Russia]*. - № 66 (6), 2020. – pp. 28-38. DOI 10.30679/2219-5335-2020-6-66-28-38 (in Russian).
14. Wang L., Liu P-F., Zhao H., Zhu G-P., Wuyun T-N. Comparative transcriptome analysis between interspecific hybridization (Huaren apricot ♀ × almond ♂) and intraspecific hybridization (Huaren apricot) during young fruit developmental stage. *Scientia Horticulturae*. - 2018, 240, pp 397-404 <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.038>
15. Migunova E.S. *Lesnaya tipologiya i botanika. Ekologicheskaya otsenka faktorov prirodnoy sredy* [Forest typology and botany. Ecological assessment of natural factors] // *Lesnoy vestnik [Forest Bulletin]*. – 2020. - Т. 24. - № 4. - p. 65-81. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-4-65-81 (in Russian).

16. Slavskiy V. A., Vodolazhsky A. N., Biganova S. G. A comprehensive assessment of the sustainability of nuts of the genus *Juglans* on adaptive features in the Voronezh region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. International Scientific and Practical Conference. – 2019. 226 012016. doi:10.1088/1755-1315/226/1/012016

17. 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*. – 2019. 392 012007 doi:10.1088/1755-1315/392/1/012007

18. Solov'yeva M.V., Zalesov S.V., Zalesova Ye.S., Krekova YA.A., Opletayev A.S. *Perspektivnost' sortov yeli kolyuchey (Picea Pungens Engelm.) dlya ozeleneniya severnykh gorodov* [Prospects of prickly spruce varieties (*Picea Pungens Engelm.*) for landscaping northern cities]. *Vestnik BGSKHA im. V.R. Filippova* [Bulletin of the BSAA named after V.R. Filippova]. – No: 2 (55). – 2019. – pp. 121-129. DOI: 10.34655/bgsha.2019.55.2.017 (in Russian).

19. Slavskiy V., Litovchenko D., Matveev S., Sheshnitsan S., Larionov M. Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East Euro-pean Plain. *Land*. 2023, 12, 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12010103>.

20. 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. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777> (in Russian).

### Сведения об авторах

✉ *Славский Василий Александрович* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6579-0344>; e-mail: [slavskiyva@yandex.ru](mailto:slavskiyva@yandex.ru).

*Славская Галина Ивановна* – преподаватель кафедры иностранных языков, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2784-9133>, e-mail: [galinas2401@mail.ru](mailto:galinas2401@mail.ru).

### Information about the authors

✉ *Vasily A. Slavskiy* – DSc (Agricultural Sciences), Professor of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6579-0344>, e-mail: [slavskiyva@yandex.ru](mailto:slavskiyva@yandex.ru).

✉ *Galina Iv. Slavskaya* – Teacher of the Department of Foreign Languages, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2784-9133>, e-mail: [galinas2401@mail.ru](mailto:galinas2401@mail.ru).

✉ Для контактов/Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/7>


УДК 630\*52:630\*174.754



## Региональное ранжирование базисной плотности запаса стволовой древесины у лиственных древесных видов Евразии

Владимир А. Усольцев<sup>1,2</sup>✉, [usoltsev50@mail.ru](mailto:usoltsev50@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

Николай И. Плюха<sup>1</sup>, [nickskript@mail.ru](mailto:nickskript@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>

Иван С. Цепордей<sup>2</sup>, [ivan.tsepordey@yandex.ru](mailto:ivan.tsepordey@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», ул. 8 марта, 202а, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация

Базисная плотность (БП) древесины, как отношение абсолютно сухой массы к ее объему, широко используется для оценки качества древесины в различных областях применения. В литературных источниках показатели БП древесины и коры анализируются отдельно, однако в современных таксационных нормативах запасы стволовой древесины приводятся вместе с корой. При необходимости рассчитать биомассу стволов в коре по данным объемов получить искомый результат невозможно, поскольку неизвестно соотношение древесины и коры. На сегодня исследования БП стволов в коре для различных древесных видов Евразии в литературе отсутствуют. Целью настоящей работы был анализ региональных особенностей БП запаса стволовой древесины в коре у лиственных древесных видов Евразии. По материалам авторской базы данных о биомассе насаждений сформирована выборка из 2340 пробных площадей с таксационными характеристиками 6 лиственных древесных родов как совокупностей видов, викарирующих в пределах Евразии, и 2 видов. Рассчитаны модели для оценки БП древесины в коре, включающие численные независимые переменные в виде возраста и густоты древостоя и блок фиктивных независимых переменных, кодирующих региональную принадлежность исходных данных в пределах рода (вида). Для средних значений возраста и густоты выполнено ранжирование родов и видов по величине БП. Поскольку по многим регионам исходные данные отсутствуют, выполнено ранжирование видов Евразии по средним показателям БП. Ряд ранжирования начинается буком европейским (*Fagus sylvatica* L.) и дубом красным (*Quercus rubra* L.) (652 и 641 кг/м<sup>3</sup>) и завершается тополем волосистоплодным (*Populus trichocarpa* Torr. & A.Gray ex Hook.) и тополем Давида (*Populus davidiana* (Dode) Hultén) (329 и 299 кг/м<sup>3</sup>). Полученные модели и ранжирования видов по величине БП запаса стволовой древесины в коре могут быть использованы при расчетах углеродного пула в лиственных древостоях Евразии по данным инвентаризации лесов.

**Ключевые слова:** базисная плотность древесины в коре, гармонизация базисной плотности, 27 лиственных видов Евразии, модель смешанного типа

**Финансирование:** работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада УрО РАН (№ 123112700125-1).

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


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

**Для цитирования:** Усольцев, В. А. Региональное ранжирование базисной плотности запаса стволовой древесины у лиственных древесных видов Евразии / В. А. Усольцев, Н. И. Плюха, И. С. Цепордей // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 103–126. – Библиогр.: с. 121–126 (40 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/7>.

*Поступила* 17.04.2024. *Пересмотрена* 28.04.2024. *Принята* 29.04.2024. *Опубликована онлайн* 17.06.2024.

Article

## Regional ranking of the basic density of the stem wood in deciduous tree species of Eurasia

Vladimir A. Usoltsev<sup>1,2</sup> ✉, [usoltsev50@mail.ru](mailto:usoltsev50@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

Nikolay I. Plyukha<sup>1</sup>, [nikskript@mail.ru](mailto:nikskript@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>

Ivan S. Tsepordey<sup>2</sup>, [ivan.tsepordey@yandex.ru](mailto:ivan.tsepordey@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>

<sup>1</sup>Ural State Forestry Engineering University, Siberian tract, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

<sup>2</sup>Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 8 Marta str., 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

### Abstract

The basic density (BD) of wood, as the ratio of dry mass to its volume, is widely used to assess the quality of wood in various fields of application. In the literature, the BD of wood and bark are analyzed separately, however, in modern taxation standards, stem volumes are given together with bark. If it is necessary to calculate the biomass of stems above bark according to the available volume data, then it is impossible to obtain the desired result with sufficient accuracy, since the ratio of wood and bark is unknown. Currently, there are no studies of BD stems above bark for various tree species of Eurasia. The purpose of this work was to analyze the regional characteristics of the BD of stems above bark of deciduous tree species of Eurasia. Based on the materials of the author's database on the forest biomass, a sample of 2,340 sample plots with taxation characteristics of 6 deciduous tree genera as aggregates of species within Eurasia as well as 2 single species was formed. Models for estimating the BD of stems above bark are calculated, including numerical independent variables in the form of age and density of the stand and a block of dummy variables encoding the regional affiliation of the source data within the genus (species). For the average values of age and density, the ranking of genera and species by BD value is performed. Since there are no initial data for many regions, the ranking of Eurasian species by average BD indicators is performed. The ranking series begins with *Fagus sylvatica* L. and *Quercus rubra* L. (652 and 641 kg/m<sup>3</sup>) and ends with *Populus trichocarpa* Torr. & A.Gray ex Hook. and *Populus davidiana* (Dode) Hultén (329 and 299 kg/m<sup>3</sup>). The obtained models and ranking of species by the value of the BD of stems above bark can be used to calculate the carbon pool in deciduous stands of Eurasia according to forest inventory data.

**Keywords:** *basic density of wood above bark, harmonization of basic density, 27 deciduous species of Eurasia, mixed type model*

**Funding:** the work was carried out within the framework of a state assignment the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (№ 123112700125-1).

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

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



**For citation:** Usoltsev V. A., Plyukha N. I., Tsepordey I. S. (2024). Regional ranking of the basic density of the stem wood in deciduous tree species of Eurasia. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 103-126 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/7>.

*Received* 17.04.2024. *Revised* 28.04.2024. *Accepted* 29.04.2024. *Published online* 17.06.2024.

## Введение

Согласно исследованиям И.С. Цепордея и В.А. Усольцева (2021) [9] и D.T. Medeiros и др. (2023) [29], базисная плотность (БП) древесины, как отношение абсолютно сухой массы к ее объему, является ключевым свойством, широко используемым для оценки качества древесины в различных областях применения. БП стволовой древесины определяет существенную долю варьирования при оценках биомассы и в расчетах связывания углерода и тесно связана с ключевыми аспектами физиологических характеристик дерева, что отмечают в своих работах D.W. MacFarlane (2020) [24] и О.И. Полубояринов и др. (1982)<sup>11</sup>. До настоящего времени аллометрические модели для оценки БП основывались на ограниченных исходных данных, и там, где отсутствовали данные БП для конкретных видов и регионов, использовались значения близких видов и регионов, а при отсутствии таковых использовались средние значения опубликованных данных (мета-данные), как, например, в исследовании M. Marden и др. (2021) [25].

При анализе существующих методов оценки наземной биомассы различают прямой и косвенный подходы. Подход, основанный на объеме ствола или запасе стволовой древесины и базисной плотности (БП) ствола, называется косвенным подходом. В отличие от прямых подходов, основанных на аллометрических моделях, этот косвенный подход "объем × БП" имеет то преимущество, что дает возможность использования имеющихся данных о запасах древесины из национальных лесных кадастров, которые обычно основаны на надежной статистической выборке. Они, согласно исследованиям J. Liepiņš и др. (2023) [16] и M. Marden и др. (2021) [25], позволяют

получить данные о биомассе древесины, представляющие интерес для многих промышленных применений. Прямые подходы в виде моделей, непосредственно дающих значения биомассы, менее репрезентативны для крупномасштабных районов, поскольку они, как правило, основаны на локальных исследованиях. При сравнении обоих подходов A. Billard и др. (2020) [22] было установлено, что подход "объем × БП" приводит к меньшей погрешности, чем прямой метод, основанный на аллометрических моделях биомассы.

Согласно исследованиям M. Balasso и др. (2021) [13] и Y. Takahashi и др. (2024) [27], БП является одним из важнейших свойств древесины, поскольку положительно коррелирует с ее механическими свойствами. Как следует из работы J.P. Elissetche и др. (2024) [39], БП – это интегративный признак, который позволяет оценивать физические и механические свойства и является коммерчески значимым свойством при производстве древесины. Установлено, что виды с более высокой БП древесины удовлетворительно растут в условиях низкого влагообеспечения. Но, с другой стороны, исследование S.E.L. Costa и др. (2020) [35] свидетельствует о том, что в регионах высокого теплообеспечения древесина имеет повышенную, а быстрорастущие породы имеют более низкую БП древесины. Результаты исследования, выполненные в Бразилии, показали, что в более сухих местообитаниях наблюдается меньший запас и биомасса древесины, но более высокая БП. Эта более высокая плотность древесины связана со снижением скорости роста деревьев. В итоге было установлено, что климатические изменения существенно влияют на БП древесины и ее биомассу. В работах А.Н. Хоха (2023) [6], И.С. Цепордея и В.А. Усольцева (2021) [7], A. Debel

<sup>11</sup> Полубояринов О.И., Некрасова Г.Н., Фёдоров Р.Б. О взаимосвязи влажности и плотности древесины растущих деревьев // Лесной журнал. 1982. № 2. С. 7-11.

и др. (2024) [12], S.M.G. Rocha и др. (2020) [23], подчеркивается важность учета метеорологических факторов при оценке БП древесины и понимания ее потенциальной значимости для промышленного применения и лесопользования в контексте изменения климата.

В результате исследования M.N.F. Almeida и др. (2023) [40] в Бразилии показано, что из проанализированных климатических переменных наиболее сильную корреляцию с БП древесины показала средняя температура воздуха. Было обнаружено, что некоторые виды деревьев уязвимы к повышению максимальных температур, в то время как другие выигрывают от глобального потепления. В работе E.D. Vivar-Vivar и др. (2021) [15] подчеркивается необходимость более точного определения взаимодействия между поглощением углерода деревьями и изменчивостью гидротермических показателей на основе измерения квалитетических характеристик, в том числе БП древесины. В.И. Мелехов и др. (2003) [1] и M. Pompa-García и др. (2023) [32] в своих исследованиях приходят к выводу, что лучшее понимание этих механизмов позволяет разрабатывать и внедрять более эффективные программы управления в соответствии с климатическими реакциями видов, а также способствует пониманию динамики углерода в разных типах леса и климатических условиях.

Известно, что различия БП в пределах вида имеются у деревьев разного возраста и размера<sup>12,13,14,15</sup> [11, 25, 28, 38], а также по длине ствола<sup>16,17</sup> [34, 36, 37] и в направлении от сердцевины к коре [20, 30, 32, 34]. Однако характер радиальной изменчивости, исследованный в работах A. Soro и др. (2022) [19] и Y. Takahashi и др. (2024) [27], может различаться в зависимости от генетического фона и условий окружающей среды.

Поскольку процесс определения БП в полевых условиях, по мнению P. Prislan и др. (2022) [33],

является довольно трудоемким, в большинстве исследований, согласно данным S.P. Augustine и др. (2024) [21], используются средние по древесным видам значения БП, взятые из глобальных хранилищ. Существуют также быстрые и неразрушающие методы, которые можно использовать для прогнозирования БП древесины, в частности, спектроскопия в ближнем инфракрасном диапазоне. Этот метод позволяет оценивать широкий круг физических [18], химических [17] и механических характеристик древесины и может применяться при мониторинге в режиме реального времени, в том числе в полевых условиях [25]. Кроме того, согласно исследованию M. Demol и др. (2021) [14], современные методы наземного лазерного сканирования и рентгеновская компьютерная томография могут применяться для непосредственного измерения надземного объема и объема корней деревьев. K. Liepiņš и др. (2023) [36] в своей работе приходят к мнению, что для преобразования объемов компонентов деревьев в биомассу требуются точные значения БП.

В исследовании БП древесины кустарниковых и древесных видов Новой Зеландии различного возраста M. Marden и др. (2021) [25] установлено, что для наиболее географически распространенных видов кустарников различия в условиях произрастания влияют на БП древесины в большей степени, чем различия в географической широте в пределах ареала произрастания вида, и что БП древесины увеличивается с уменьшением высоты над уровнем моря и повышением температуры. Для каждого из исследованных видов БП древесины увеличивается до возраста 6 лет, а при дальнейшем повышении возраста остается без изменения. Изменчивость БП древесины у наиболее распространенного вида *Kunzea spp.* объяснялась влиянием диаметра ствола лишь на 6,7% [26], а у ели (*Picea abies* (L.) H. Karst.), пихты (*Abies alba* Mill.) и дугласии (*Pseudotsuga*

<sup>12</sup> Исаева Л.Н. Метод расчета локальной и средней плотности абсолютно сухой древесины в стволах сосны и лиственницы // Лесоведение. 1978. № 4. С. 90-94.

<sup>13</sup> Молчанов А. А. Научные основы ведения хозяйства в дубравах лесостепи. Москва : Наука, 1964. 255 с.

<sup>14</sup> Полубояринов О. И. Плотность древесины. Москва: Лесная промышленность, 1976. 160 с.

<sup>15</sup> McKinley R., Shelbourne C.J.A., Harris J.M., Young G.D. Variation in whole- tree basic wood density for a range of plantation species

grown in New Zealand // New Zealand Journal of Forestry Science. 2000. Vol. 30. No. 3. P. 436-446.

<sup>16</sup> Исаева Л.Н. Метод расчета локальной и средней плотности абсолютно сухой древесины в стволах сосны и лиственницы // Лесоведение. 1978. № 4. С. 90-94.

<sup>17</sup> Полубояринов О.И. Плотность древесины. Москва: Лесная промышленность, 1976. 160 с.

*menziesii* (Mirb.) Franco) на востоке Франции связь БП ствола с его диаметром отсутствовала [23]. В то же время, у порослевых деревьев пяти видов на западе Африки R. Nygård и B. Elfving (2000) [28] выявлена положительная связь БП с диаметром ствола, объясняющая от 5 до 24 % общего варьирования БП.

В Новой Зеландии были исследованы культуры 11 видов лиственных и 2 видов хвойных в количестве 968 деревьев.<sup>18</sup> Высокая положительная связь БП с возрастом дерева была выявлена у двух видов акации ( $R^2 = 0,75-0,85$ ) и менее значимая у 9 видов эвкалипта ( $R^2 = 0,27-0,71$ ). В то же время, для хвойных дугласии (*P. Menziesii* (Mirb.) Franco) и кипарисовика (*Chamaecyparis lawsoniana* (Murray) Par.) связь БП ствола с возрастом отсутствовала.<sup>19</sup> Среди эвкалиптов прогнозируемая средняя БП всего ствола в возрасте 30 лет варьировала от 452 до 623 кг/м<sup>3</sup>, а для акации составила около 700 кг/м<sup>3</sup>. Два хвойных вида показали значительно меньшую БП в возрасте 30 лет по сравнению с лиственными, соответственно 406 и 418 кг/м<sup>3</sup> для дугласии (*P. menziesii* (Mirb.) Franco) и кипарисовика (*C. lawsoniana* (Murray) Par.).<sup>20</sup>

В работах R. Petráš и др. (2020) [10] и K. Liepiņš и др. (2023) [36] установлено, что БП древесины различается в различных компонентах дерева, а именно в стволе, коре, ветвях и корнях. Согласно исследованию В.А. Усольцева (1985) [5], у осины (*Populus tremula* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в степной зоне БП ветвей выше по отношению к БП ствола соответственно на 11 и 8 %, тогда как данные исследования R. Nygård и B. Elfving (2000) [28] свидетельствуют о том, что у порослевых древесных видов на Западе Африки соотношение противоположное. У 78 видов на востоке США D.W. MacFarlane (2020) [24] установлена положительная связь БП древесины ствола и ветвей с коэффициентами детерминации от 0,67 до 0,80, а отношение БП ветвей к БП ствола снижается по мере увеличения БП ствола. В тропических лесах Пуэрто-Рико была определена БП древесины стволов и ветвей у 33 деревьев и 14 кустарников 27 видов.

В обоих случаях обнаружено, что БП древесины ветвей является хорошим предиктором БП древесины стволов при использовании линейных регрессий с коэффициентами детерминации соответственно 0,89 и 0,87. Это говорит о том, что БП древесины ствола можно оценить для рассматриваемых видов, используя срезы ветвей, без необходимости взятия кернов из ствола. Предполагается, что варьирование плотности древесины в пределах дерева определяется компромиссом между механической устойчивостью и гидравлической проводимостью ксилемы всего дерева [24].

Во всех процитированных выше работах оценивалась БП собственно древесины, без учета коры. В литературных источниках (В.А. Усольцев и И.С. Цепордей (2022) [3], В.А. Усольцев (1985) [5], R. Petráš и др. (2020) [10]) показатели БП древесины и коры анализируются отдельно, причем они различаются существенно. Однако современные таксационные нормативы часто оценивают объемы ствола и запасы стволовой древесины вместе с корой. Если необходимо рассчитать биомассу стволов в коре по имеющимся данным объемов на основе БП, различающейся для древесины и коры, то получить искомым результат с достаточной точностью невозможно, поскольку в каждом конкретном случае неизвестно соотношение древесины и коры. Между тем доля коры в массе ствола, согласно данным исследования R. Nygård и B. Elfving (2000) [28], может варьировать от 9 до 53 %.

Наличие огромных массивов данных о запасах стволовой древесины в коре, накопленных традиционной лесной таксацией, дает возможность оценивать абсолютно сухую биомассу стволов в коре на больших площадях, используя известные значения БП стволов на уровне древостоя. Когда значения БП древесины доступны лишь для ограниченного числа древесных видов и регионов, запас древесины преобразуется в запасы углерода с использованием всеобщих моделей БП. В тех случаях, когда видоспецифичные или региональные значе-

<sup>18</sup> McKinley R., Shelbourne C.J.A., Harris J.M., Young G.D. Variation in whole-tree basic wood density for a range of plantation species grown in New Zealand // New Zealand Journal of Forestry Science. 2000. Vol. 30. No. 3. P. 436–446.

<sup>19</sup> Там же.

<sup>20</sup> Там же.

ния БП стволовой древесины недоступны, используются средние значения всех опубликованных данных, следует из работы М. Marden и др. (2021) [25].

Насколько нам известно, исследования БП стволов в коре для различных древесных видов Евразии в литературе отсутствуют.

Целью настоящей работы был анализ региональных особенностей БП запаса стволовой древесины в коре у лиственных древесных видов Евразии.

Для ее реализации были поставлены задачи:

– разработать регрессионные модели смешанного типа для БП запаса стволовой древесины в коре, специфичные по регионам и древесным видам;

– выполнить ранжирование древесных видов Евразии по величине БП стволовых запасов по регионам и древесным видам.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследований*

Объект исследований – древостои лиственных древесных видов, произрастающих на территории Евразии.

Предметом исследований явилась базисная плотность стволов в коре.

#### *Сбор данных*

Источником исходных материалов для регрессионного моделирования послужила база данных о биомассе и первичной продукции лесов Евразии, сформированная В.А. Усольцевым (2023) [4].

По материалам базы данных о биомассе насаждений [4] сформирована выборка из 2 340 пробных площадей с таксационными характеристиками 6 лиственных древесных родов и 2 видов (табл. 1). Применена структура модели смешанного типа [2], включающей два типа независимых переменных – численные и качественные (фиктивные). Последние кодируют принадлежность данных к тому или иному региону (табл. 2). Возраст древостоя и его густота в качестве численных переменных введены в структуру модели с целью сопоставимости

БП древостоев по регионам в пределах того или иного рода (вида).

Принята к анализу структура регрессионной модели, приведенная в монографии И.С. Цепордея (2023) [8]:

$$\ln(BD) = a_0 + b_1 \ln(A) + b_2 \ln(N) + \sum a_i X_i, \quad (1)$$

где  $BD$  – базисная плотность (БП) ствола в коре, кг/м<sup>3</sup>;

$A$  – возраст древостоя, лет;

$N$  – число стволов на га, тыс. экз.;

$\sum a_i X_i$  – блок фиктивных переменных;

$a_0$  – скорректированный свободный член

уравнения [8].

#### *Анализ данных*

Предполагалось, что для обеспечения сопоставимости данных БП по регионам необходимо обеспечить их равенство по таксационным показателям, а именно, по возрасту и густоте. Для последующих расчетов использована стандартная программа регрессионного анализа.

### Результаты

Результаты расчета моделей (1) представлены в табл. 3.

Для некоторых родов возраст древостоя или его густота в качестве независимых переменных оказались не значимыми ( $t = 0,15 - 0,90 < t_{95} = 1,96$ ), и они были исключены из структуры модели (табл. 3). О степени адекватности моделей (1) и отсутствии корреляции остатков можно судить по соотношению эмпирических и расчетных значений БП (рис. 1).

Далее модели (1) протабулированы по задаваемым средним значениям возраста (56 лет) и густоты древостоев (5,4 тыс. экз./га), рассчитанным по исходным данным, и по составленным таблицам выполнено ранжирование регионов для каждого из родов (видов) (рис. 2).

# Природопользование

Таблица 1

Распределение 2 340 пробных площадей по регионам и видам с характеристикой исходных данных

Table 1

Distribution of 2 340 sample plots by regions and species with characteristics of the initial data

Регионы (страны)   Regions (countries)	Вид   Species	Код*   Code*	Число пробных площадей   Number of sample plots	Диапазоны   Ranges				
				A, лет   A, years	N, 1000/га   N, 1000/ha	БП, кг/м <sup>3</sup>   BD, kg/m <sup>3</sup>	Координаты   Coordinates	
							с. ш., °   N	в. д., °   E
Береза. Род <i>Betula</i> L. (582 пробных площади в 15 регионах)   Birch. Genus <i>Betula</i> L. (582 sample plots in 15 regions)								
Западная Европа   Western Europe	<i>Betula pendula</i> Roth	ЗЕ	22	6-80	0,74-10,5	489-550	52,5-54,2	-2,9-1,3
Скандинавия   Scandinavia	<i>B. pendula</i>	СКН	7	6-75	0,08-43,8	492-627	59,7-64,0	11,5-27,7
Белоруссия   Belarus	<i>B. pendula</i>	Бел	16	30-80	0,35-3,7	417-764	52,0-54,8	26,0-29,8
Украина   Ukraine	<i>B. pendula</i>	Ук	99	8-81	0,28-24,3	398-613	48,0-52,1	26,0-33,9
РФ, северо-запад России   RF, North-West of Russia	<i>B. pendula</i>	СЗР	44	10-110	0,69- 107,0	367-594	59,5-68,5	30,6-41,0
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	<i>B. pendula</i>	ЦРР	113	2-91	0,28- 2163,0	356-682	49,0-58,3	32,7-44,0
РФ, восток Русской равнины   RF, Eastern Russian Plain	<i>B. pendula</i>	ВРР	44	6-95	0,54-85,5	337-656	57,8-60,0	40,0-44,0
РФ, Урал   RF, Ural	<i>B. pendula</i>	Ур	46	5-75	0,74-76,2	396-732	55,5-67,0	57,0-63,0
РФ, Западная Сибирь   RF, Western Siberia	<i>B. pendula</i>	ЗС	15	20-100	0,29-4,9	365-696	54,5-61,3	69,0-90,0
РФ, Средняя Сибирь   RF, Middle Siberia	<i>B. pendula</i>	СС	79	10-100	0,33-10,2	374-776	52,0-70,0	67,0-99,0
РФ, Восточная Сибирь   RF, Eastern Siberia	<i>B. pendula</i>	ВС	14	13-100	0,86-97,0	451-608	51,0-62,0	105,5- 130,0
РФ, Приморье   RF, Pri- morye	<i>B. costata</i> Trautv.	ПРМ	14	60-240	0,15-5,3	406-560	44,0-56,3	127,3- 160,7
Северный Казахстан   Northern Kazakhstan	<i>B. pendula</i>	СК	57	5-86	0,34-43,4	446-626	53,0-55,3	64,0-70,0
Китай   China	<i>B. platyphylla</i> Sukaczew	Кит	4	35-100	0,50-1,42	446-511	37,2-52,5	100,6- 128,3
Япония   Japan	<i>B. maximowicziana</i> Regel	Яп	8	10-47	0,27-20,1	483-645	34,0-43,5	135,5- 144,0

## Природопользование

Регионы (страны)   Regions (countries)	Вид   Species	Код*   Code*	Число пробных площадей   Number of sample plots	Диапазоны   Ranges				
				A, лет   A, years	N, 1000/га   N, 1000/ha	БП, кг/м <sup>3</sup>   BD, kg/m <sup>3</sup>	Координаты   Coordinates	
							с. ш., °   N	в. д., °   E
Тополь. Род <i>Populus</i> L. (381 пробная площадь в 16 регионах)   Poplar. Genus <i>Populus</i> L. (381 sample plots in 16 regions)								
Западная Европа   Western Europe	<i>Populus trichocarpa</i> Torr. & A.Gray ex Hook.	ЗЕ	15	2-10	1,48- 150,0	350-355	46,0-54,0	-1,0-4,0
Центральная Европа   Central Europe	<i>P. trichocarpa</i>	ЦЕ	8	3-6	2,0-10,0	243-400	51,0-52,0	3,7-5,0
Прибалтика   Baltics	<i>P. tremula</i> L.	ПРБ	7	9-57	0,69-15,6	386-429	54,8-58,5	26,8-28,0
Украина 1   Ukraine 1	<i>Populus</i> <i>×euramericana</i> (Dode) Guinier	Ук1	10	14-30	0,64-3,7	398-605	51,1-51,8	31,4-31,9
Украина 2   Ukraine 2	<i>P. tremula</i>	Ук2	48	2-52	0,67- 131,4	327-542	45,0-56,7	31,9-36,3
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	<i>P. tremula</i>	ЦРР	45	2-85	0,50-98,9	358-589	49,0-58,2	32,7-55,0
РФ, восток Русской равнины   RF, Eastern Russian Plain	<i>P. tremula</i>	ВРР	9	11-77	0,49-32,2	404-555	57,3-63,5	38,7-50,7
РФ, Западная Сибирь   RF, Western Siberia	<i>P. tremula</i>	ЗС	19	6-67	0,57-30,5	353-667	55,5-58,5	73,5-83,5
РФ, Средняя Сибирь 1   RF, Middle Siberia 1	<i>P. tremula</i>	СС1	23	15-95	0,71-10,0	383-461	53,0-60,0	89,5-97,8
РФ, Средняя Сибирь 2   RF, Middle Siberia 2	<i>P. laurifolia</i> Ledeb.	СС2	12	10-120	0,23-7,9	378-382	51,8-52,2	95,8-96,2
РФ, Восточная Сибирь   RF, Eastern Siberia	<i>P. tremula</i>	ВС	4	16-140	0,64-13,0	482-553	51,0-56,0	101,0- 160,0
Северный Казахстан 1   Northern Kazakhstan 1	<i>P. alba</i> L.	СК1	9	11-68	0,22-12,5	398-740	50,9-51,1	51,1-51,5
Северный Казахстан 2   Northern Kazakhstan 2	<i>P. tremula</i>	СК2	31	10-53	0,41-26,3	394-590	53,0-55,0	64,0-70,2
Китай 1   China 1	<i>P. euphratica</i> Olivier	Кит1	9	25-53	0,10-2,4	237-497	38,4-48,0	80,6-88,1
Китай 2   China 2	<i>P. deltoides</i> W.Bartram ex Marshall	Кит2	123	25-110	0,15-7,3	334-768	25,7-52,5	85,2-134,0

## Природопользование

Регионы (страны)   Regions (countries)	Вид   Species	Код*   Code*	Число пробных площадей   Number of sample plots	Диапазоны   Ranges				
				A, лет   A, years	N, 1000/га   N, 1000/ha	БП, кг/м³   BD, kg/m³	Координаты   Coordinates	
							с. ш., °   N	в. д., °   E
Япония   Japan	<i>P. davidiana</i> (Dode) Hultén	Яп	9	11-33	0,40-1,2	267-383	39,0-43,2	141,5-142,4
Дуб. Род <i>Quercus</i> L. (633 пробные площади в 13 регионах)   Oak. Genus <i>Quercus</i> L. (633 sample plots in 13 regions)								
Западная Европа 1   Western Europe 1	<i>Quercus robur</i> L.	ЗЕ1	7	21-110	0,58-7,7	481-703	43,2-54,2	-4,2-1,8
Западная Европа 2   Western Europe 2	<i>Quercus petraea</i> (Matt.) Liebl.	ЗЕ2	13	21-200	0,12-10,1	452-643	47,8-51,2	0,2-5,0
Центральная Европа 1   Central Europe 1	<i>Q. robur</i>	ЦЕ1	22	13-200	0,11-10,3	441-734	47,5-60,1	3,8-28,5
Центральная Европа 2   Central Europe 2	<i>Q. petraea.</i>	ЦЕ2	18	22-140	0,16-17,0	476-737	42,0-52,5	4,5-28,7
Центральная Европа 3   Central Europe 3	<i>Q. rubra</i> L.	ЦЕ3	13	17-150	0,88-10,9	561-737	37,7-47,0	3,9-28,8
Белоруссия   Belarus	<i>Q. robur</i>	Бел	57	30-180	0,17-3,9	461-691	52,0-53,5	27,9-28,1
Украина   Ukraine	<i>Q. robur</i>	Ук	102	5-220	0,21-14,4	409-858	45,0-51,8	23,8-37,3
Кавказ 1   Caucasus 1	<i>Q. castaneifolia</i> С.А.Мей.	Кав1	9	18-156	0,49-1,6	563-624	39,0-42,2	43,0-48,5
Кавказ 2   Caucasus 2	<i>Q. robur</i>	Кав2	20	15-60	0,73-5,7	619-865	45,8-46,2	43,9-44,1
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	<i>Q. robur</i>	ЦРР	158	4-280	0,07-200,0	411-867	46,0-56,0	36,0-45,3
РФ, Приморье   RF, Primorye	<i>Q. mongolica</i> Fisch. ex Ledeb.	ПРМ	22	35-190	0,50-4,9	525-877	43,0-43,5	133,8-134,2
Китай 1   China 1	<i>Q. mongolica</i>	Кит1	183	20-160	0,17-8,3	337-811	26,0-51,7	96,7-134,0
Китай 2   China 2	<i>Q. serrata</i> Murray	Кит2	9	76-232	0,16-1,1	390-498	27,7-29,8	85,9-101,5
Бук. Род <i>Fagus</i> L. (206 пробных площадей в 5 регионах)   Beech. Genus <i>Fagus</i> L. (206 sample plots in 5 regions)								
Западная Европа   Western Europe	<i>Fagus sylvatica</i> L.	ЗЕ	16	8-210	0,21-16,8	533-650	42,3-51,2	-4,2-7,2
Центральная Европа   Central Europe	<i>F. sylvatica</i>	ЦЕ	121	8-400	0,15-510,0	417-852	41,9-56,3	5,1-25,0
Украинские Карпаты   Ukrainian Carpathians	<i>F. sylvatica.</i>	УК	34	10-137	0,43-51,8	440-653	48,5-49,2	23,0-26,0
Кавказ   Caucasus	<i>F. orientalis</i> Lipsky	Кав	4	70-168	0,54-1,3	473-620	41,0-44,1	40,3-49,0

## Природопользование

Регионы (страны)   Regions (countries)	Вид   Species	Код*   Code*	Число пробных площадей   Number of sample plots	Диапазоны   Ranges				
				A, лет   A, years	N, 1000/га   N, 1000/ha	БП, кг/м <sup>3</sup>   BD, kg/m <sup>3</sup>	Координаты   Coordinates	
							с. ш., °   N	в. д., °   E
Япония   Japan	<i>F. crenata</i> Blume	Яп	31	35-150	0,23-5,2	490-665	35,3-37,5	135,7-139,9
Липа. Вид <i>Tilia cordata</i> Mill. (257 пробных площадей в 6 регионах)   Linden. Species <i>Tilia cordata</i> Mill. (257 sample plots in 6 regions)								
Северная Европа   Northern Europe	<i>Tilia cordata</i> Mill.	СЕ	4	32-116	0,21-4,6	360-569	60,0-60,2	17,7-17,9
Украина   Ukraine	<i>T. cordata</i>	Ук	4	5-71	5,23-52,0	399-725	47,2-51,8	28,5-37,4
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	<i>T. cordata</i>	ЦРР	9	11-77	0,62-115,0	397-731	51,7-56,3	36,3-44,0
РФ, восток Русской равнины   RF, Eastern Russian Plain	<i>T. cordata</i>	ВРР	164	20-150	0,13-9,7	400-462	52,5-56,7	48,0-52,0
РФ, Южный Урал   RF, Southern Urals	<i>T. cordata</i>	ЮУр	58	8-150	0,16-36,2	348-525	53,5-55,8	55,0-57,0
РФ, Средний Урал   RF, Middle Urals	<i>T. cordata</i>	СУр	18	34-96	0,50-10,6	271-491	56,7-57,0	57,7-59,5
Ольха. Род <i>Alnus</i> Mill. (184 пробных площади в 7 регионах)   Alder. Genus <i>Alnus</i> Mill. (184 sample plots in 7 regions)								
Центральная Европа   Central Europe	<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	ЦЕ	8	3-50	1,60-40,0	310-533	50,0-60,8	1,3-16,5
Прибалтика   Baltics	<i>A. glutinosa</i> (L.) Gaertn.	ПРБ	9	14-70	0,67-5,3	438-551	55,3-55,7	23,4-23,8
Белоруссия 1   Belarus 1	<i>A. incana</i>	Бел1	4	25-60	0,42-5,4	459-460	54,6-55,0	27,8-28,2
Белоруссия 2   Belarus 2	<i>A. glutinosa</i>	Бел2	14	32-60	0,72-1,75	300-504	52,0-54,8	26,5-28,2
Украина   Ukraine	<i>A. glutinosa</i>	Ук	80	7-93	0,25-33,9	319-756	47,2-51,8	23,9-38,9
РФ, северо-запад России   RF, North-West Russia	<i>A. incana</i>	СЗР	41	20-77	1,52-14,3	408-568	63,2-68,0	34,0-42,4
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	<i>A. incana</i>	ЦРР	28	3-50	0,75-524,0	310-562	55,3-58,3	33,0-38,5
Ясень. Род <i>Fraxinus</i> L. (61 пробная площадь в 5 регионах)   Ash. Genus <i>Fraxinus</i> L. (61 sample plots in 5 regions)								
Центральная Европа   Central Europe	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	ЦЕ	3	12-80	0,40-52,7	459-530	51,0-55,4	3,8-11,6
Белоруссия   Belarus	<i>F. excelsior</i>	Бел	26	45-215	0,25-2,0	473-652	51,7-52,2	27,8-28,7
Украина   Ukraine	<i>F. excelsior</i>	Ук	23	7-80	0,40-13,5	480-674	47,2-50,0	24,0-37,3



## Природопользование

Регионы (страны)   Regions (countries)	Вид   Species	Код*   Code*	Число пробных площадей   Number of sample plots	Диапазоны   Ranges				
				A, лет   A, years	N, 1000/га   N, 1000/ha	БП, кг/м <sup>3</sup>   BD, kg/m <sup>3</sup>	Координаты   Coordinates	
							с. ш., °   N	в. д., °   E
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	<i>F. excelsior</i>	ЦРР	7	14-85	0,44-6,1	511-598	51,3-51,8	42,0-55,0
Китай   China	<i>F. mandshurica</i> Rupr.	Кит	2	43-160	0,62-0,77	383-412	42,7-45,3	127,5- 128,3
Граб. Вид <i>Carpinus betulus</i> L. (36 пробных площадей в 2 регионах)   Hornbeam. Species <i>Carpinus betulus</i> L. (36 sample plots in 2 regions)								
Центральная Европа   Central Europe	<i>Carpinus betulus</i> L.	ЦЕ	6	35-78	0,70-5,6	582-652	41,0-48,6	1,8-49,0
Украина   Ukraine	<i>C. betulus</i>	Ук	30	7-88	0,44-13,5	408-733	49,0-50,0	23,8-32,7

Примечание:

\*Для удобства анализа заявленного ранжирования регионов по величине БП древесины приведена расшифровка их аббревиатуры в алфавитном порядке:

Бел – Белоруссия; ВРР – восток Русской равнины; ВС – Восточная Сибирь; ЗЕ – Западная Европа; ЗС – Западная Сибирь; Кав – Кавказ; Кит – Китай; ПРБ – Прибалтика; ПРМ – Приморье; СЗР – северо-запад России; СК – Северный Казахстан; СКН – Скандинавия; СС – Средняя Сибирь; СУ – Средний Урал; Ук – Украина; УК – Украинские Карпаты; Ур – Урал; ЦЕ – Центральная Европа; ЦРР – центр Русской равнины; ЮУ – Южный Урал; Яп – Япония.

Notes:

\*For the convenience of analyzing the claimed ranking of regions by the value of the stem BD, a decoding of their abbreviations in alphabetical order is given:

Бел – Belarus; ВРР – Eastern Russian Plain; ВС – Eastern Siberia; ЗЕ – Western Europe; ЗС – Western Siberia; Кав – Caucasus; Кит – China; ПРБ – Baltics; ПРМ – Primorye; СЗР – Northwest of Russia; СК – Northern Kazakhstan; СКН – Scandinavia; СС – Middle Siberia; СУ – Middle Urals; Ук – Ukraine; УК – Ukrainian Carpathians; Ур – Urals; ЦЕ – Central Europe; ЦРР – Center of the Russian Plain; ЮУ – Southern Urals; Яп – Japan.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

## Природопользование

Таблица 2

Схема кодирования регионов фиктивными переменными с измерениями БП стволов в коре на 2 340 пробных площадях

Table 2

Scheme of region coding by dummy variables with measurements of BD of stems above bark on 2,340 sample plots

Регионы (страны)   Regions (countries)	Фиктивные переменные   Dummy variables														
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>
Береза   Birch															
Западная Европа   Western Europe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Скандинавия   Scandinavia	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Белоруссия   Belarus	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украина   Ukraine	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, северо-запад России   RF, north-west of Russia	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, восток Русской равнины   RF, eastern Russian Plain	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Урал   RF, Urals	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Западная Сибирь   RF, Western Siberia	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Средняя Сибирь   RF, Middle Siberia	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
РФ, Восточная Сибирь   RF, Eastern Siberia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
РФ, Приморье   RF, Primorye	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Северный Казахстан   Northern Kazakhstan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Китай   China	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Япония   Japan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Тополь   Poplar															
Западная Европа   Western Europe	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Центральная Европа   Central Europe	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Прибалтика   Baltics	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украина 1   Ukraine 1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Украина 2   Ukraine 2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, восток Русской равнины   RF, eastern Russian Plain	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Западная Сибирь   RF, Western Siberia	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
РФ, Средняя Сибирь 1   RF, Middle Siberia 1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

## Природопользование

Регионы (страны)   Regions (countries)	Фиктивные переменные   Dummy variables														
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>
РФ, Средняя Сибирь 2   RF, Middle Siberia 2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
РФ, Восточная Сибирь   RF, Eastern Siberia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Северный Казахстан 1   Northern Kazakhstan 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Северный Казахстан 2   Northern Kazakhstan 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Китай 1   China 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Китай 2   China 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Япония   Japan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Дуб   Oak															
Западная Европа 1   Western Europe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Западная Европа 2   Western Europe 2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Центральная Европа 1   Central Europe 1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Центральная Европа 2   Central Europe 2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
Центральная Европа 3   Central Europe 3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0			
Белоруссия   Belarus	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0			
Украина   Ukraine	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0			
Кавказ 1   Caucasus 1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0			
Кавказ 2   Caucasus 2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0			
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0			
РФ, Приморье   RF, Primorye	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
Китай 1   China 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0			
Китай 2   China 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1			
Бук   Beech															
Западная Европа   Western Europe	0	0	0	0											
Центральная Европа   Central Europe	1	0	0	0											
Украинские Карпаты   Ukrainian Carpathians	0	1	0	0											
Кавказ   Caucasus	0	0	1	0											
Япония   Japan	0	0	0	1											
Липа   Linden															
Северная Европа   Northern Europe	0	0	0	0	0										
Украина   Ukraine	1	0	0	0	0										

## Природопользование

Регионы (страны)   Regions (countries)	Фиктивные переменные   Dummy variables														
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>14</sub>	X <sub>15</sub>
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	0	1	0	0	0										
РФ, восток Русской равнины   RF, eastern Russian Plain	0	0	1	0	0										
РФ, Южный Урал   RF, Southern Urals	0	0	0	1	0										
РФ, Средний Урал   RF, Middle Urals	0	0	0	0	1										
Ольха   Alder															
Центральная Европа   Central Europe	0	0	0	0	0	0									
Прибалтика   Baltics	1	0	0	0	0	0									
Белоруссия 1   Belarus 1	0	1	0	0	0	0									
Белоруссия 2   Belarus 2	0	0	1	0	0	0									
Украина   Ukraine	0	0	0	1	0	0									
РФ, северо-запад России   RF, north-west Russia	0	0	0	0	1	0									
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	0	0	0	0	0	1									
Ясень   Ash															
Центральная Европа   Central Europe	0	0	0	0											
Белоруссия   Belarus	1	0	0	0											
Украина   Ukraine	0	1	0	0											
РФ, центр Русской равнины   RF, center of the Russian Plain	0	0	1	0											
Китай   China	0	0	0	1											
Граб   Hornbeam															
Центральная Европа   Central Europe	0														
Украина   Ukraine	1														

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Значения регрессионных коэффициентов при независимых переменных модели (1)

Table 3

Values of regression coefficients for independent variables of the model (1)

Обозначения независимых переменных   Designations of independent variables	Древесные породы   Tree genera							
	Береза   Birch	Тополь   Poplar	Дуб   Oak	Бук   Beech	Липа   Linden	Ольха   Alder	Ясень   Ash	Граб   Hornbeam
$a_0$	6,2492	5,7301	6,3967	6,5907	5,7485	6,1580	6,1814	5,5663
$a_1(\ln A)$	-	0,0438	0,0171	-0,0572	0,0914	-	-	0,2141
$a_2(\ln N)$	-0,0173	0,0342	-	-0,0403	0,0359	-0,0416	-	0,1127
$a_3X_1$	0,0479	-0,2273	-0,1406	0,1565	-0,0578	0,0739	0,0849	0,0516
$a_4X_2$	0,1928	0,0837	-0,0481	0,0344	0,2054	-0,0132	0,2370	-
$a_5X_3$	0,0340	0,3027	-0,0893	0,0247	-0,0237	-0,0501	0,1653	-
$a_6X_4$	-0,0172	0,1374	0,0115	0,0151	-0,0241	-0,0417	-0,1931	-
$a_7X_5$	0,0127	0,1690	-0,0473	-	-0,2280	-0,0357	-	-
$a_8X_6$	-0,0126	0,2156	-0,1270	-	-	-0,0862	-	-
$a_9X_7$	0,0432	0,2346	-0,0620	-	-	-	-	-
$a_{10}X_8$	0,0208	0,1118	0,1443	-	-	-	-	-
$a_{11}X_9$	0,0751	0,0436	-0,0412	-	-	-	-	-
$a_{12}X_{10}$	0,0649	0,3026	0,0289	-	-	-	-	-
$a_{13}X_{11}$	-0,0492	0,3298	-0,1379	-	-	-	-	-
$a_{14}X_{12}$	0,0110	0,1933	-0,3666	-	-	-	-	-
$a_{15}X_{13}$	-0,0754	0,1668	-	-	-	-	-	-
$a_{16}X_{14}$	0,0821	0,3599	-	-	-	-	-	-
$a_{17}X_{15}$	-	-0,1106	-	-	-	-	-	-
Показатели адекватности   Adequacy indicators								
$adjR^2$	0,146	0,592	0,233	0,317	0,448	0,273	0,614	0,322
SE	0,101	0,119	0,128	0,113	0,082	0,097	0,076	0,110

Примечание: Коэффициент детерминации  $adjR^2$  скорректирован на количество переменных; SE – стандартная ошибка модели (1).

Note: The coefficient of determination  $adjR^2$  is adjusted for the number of variables; SE is the standard error of the model (1).

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

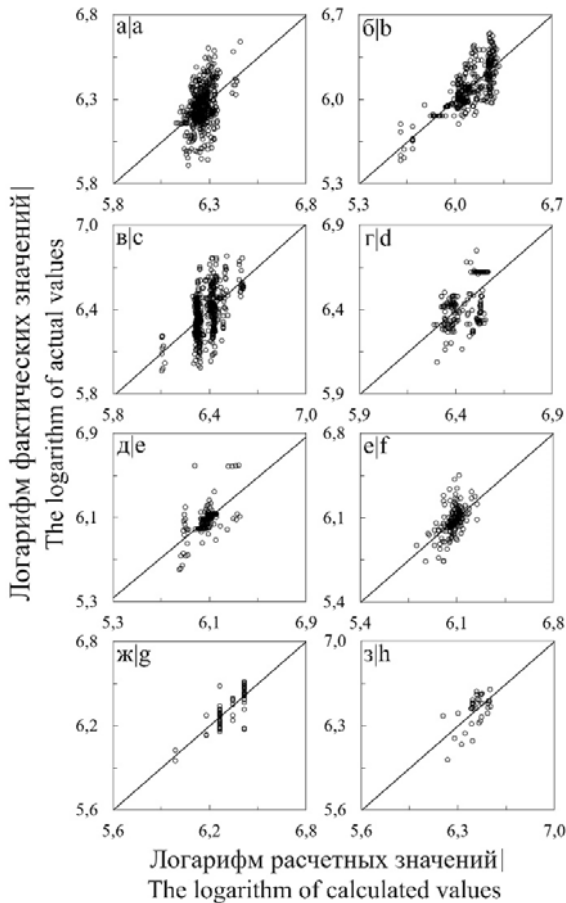


Рисунок 1. Соотношение расчетных и фактических значений БП согласно модели (1): а – береза, б – тополь, в – дуб, г – бук, д – липа, е – ольха, ж – ясень, з – граб

Figure 1. The ratio of calculated and actual BD values according to the model (1): а – birch, б – poplar, в – oak, д – beech, е – linden, ф – alder, г – ash, з – hornbeam

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: own calculations

**Обсуждение**

При анализе рис. 2 можно видеть, что у березы ряд ранжирования БП начинается с березы повислой (*Betula pendula* Roth) в Белоруссии (610 кг/м<sup>3</sup>) и заканчивается березой плосколистной (*B. platyphylla* Sukaczew) в Китае (466 кг/м<sup>3</sup>). У тополей последовательность ранжирования начинается с тополя дель-

товидного (*P. deltoides* W.Bartram ex Marshall) в Китае (558 кг/м<sup>3</sup>) и заканчивается тополем волосистоплодным (*P. trichocarpa* Torr. & A.Gray ex Hook.) в Центральной Европе (310 кг/м<sup>3</sup>). У дубов ряд начинается с дуба черешчатого (*Q. robur* L.) на Кавказе (742 кг/м<sup>3</sup>) и заканчивается дубом пильчатым (*Q. serrata* Murray) в Китае (445 кг/м<sup>3</sup>). У буков ряд начинается с бука европейского (*F. sylvatica* L.) в Центральной Европе (632 кг/м<sup>3</sup>) и заканчивается буком европейским (*F. sylvatica* L.) в Западной Европе (541 кг/м<sup>3</sup>). Липы представлены в базе данных одним видом – липой сердцевидной (*Tilia cordata* Mill.), и ее БП имеет максимальное значение в центре Русской равнины (591 кг/м<sup>3</sup>) и минимальное – на Среднем Урале (383 кг/м<sup>3</sup>). У ольхи ряд начинается с ольхи черной (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) в Прибалтике (474 кг/м<sup>3</sup>) и заканчивается ольхой серой (*A. incana* (L.) Moench) в центре Русской равнины (404 кг/м<sup>3</sup>). У ясеней ряд начинается с ясеня обыкновенного (*Fraxinus excelsior* L.) на Украине (613 кг/м<sup>3</sup>) и заканчивается ясенем маньчжурским (*Fraxinus mandshurica* Rupr.) в Китае (399 кг/м<sup>3</sup>). Граб представлен одним видом – грабом обыкновенным (*Carpinus betulus* L.) в двух регионах, и его БП составляет на Украине и в Центральной Европе соответственно 787 и 748 кг/м<sup>3</sup>.

Согласно табл. 1, территориально выделенные регионы заполнены фактическими данными неравномерно, и представленные ранжирования (рис. 2) характеризуются множеством «белых пятен», т.е. отсутствием данных по многим регионам. Для заполнения этих «белых пятен» при оценках биомассы стволов в коре на соответствующих пробных площадях приводим ранжирование средних видоспецифичных значений БП, когда данные всех регионов объединены в пределах вида (рис. 3).

Ряд ранжирования видов по величине БП (рис. 3) начинается буком европейским (*F. Sylvatica* L.) и дубом красным (*Q. rubra* L.) (652 и 641 кг/м<sup>3</sup>) и завершается тополем волосистоплодным (*P. trichocarpa* Torr. & A.Gray ex Hook.) и тополем Давида (*P. davidiana* (Dode) Hultén) (329 и 299 кг/м<sup>3</sup>).

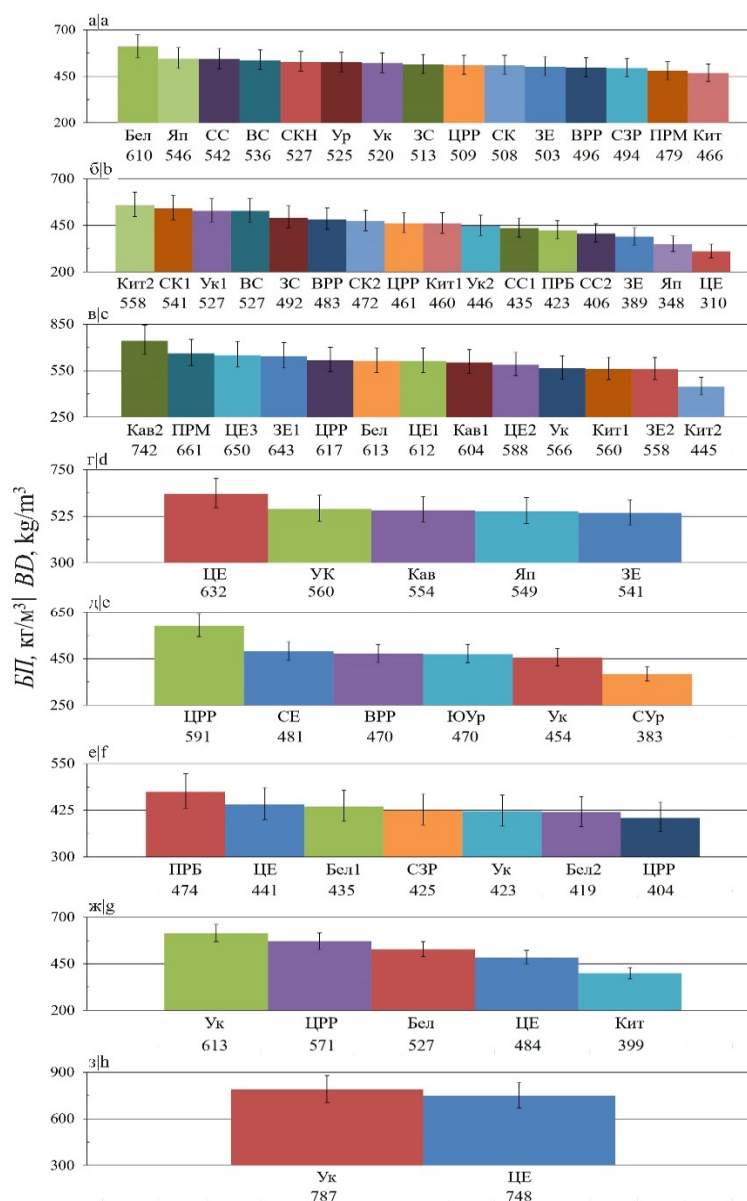


Рисунок 2. Ранжирование принятых в табл. 1 регионов по величине БП стволов в коре в убывающей последовательности для 6 лиственных родов и 2 видов: а – береза, б – тополь, в – дуб, г – бук, д – липа, е – ольха, ж – ясень, з – граб

Figure 2. Ranking of the regions accepted in Table 1 by the value of BD of stems above bark in descending order for 6 deciduous genera and 2 species: а – birch, б – poplar, в – oak, д – beech, е – linden, ф – alder, г – ash, h – hornbeam

Примечание: по оси абсцисс – аббревиатура регионов дана в табл. 1., величина БП (кг/м³) стволов в коре.  
 Note: on the abscissa axis – the abbreviation of the regions is given in Table 1., the value of BD (kg/m³) of stems above bark.

Источник: собственные вычисления авторов  
 Source: own calculations

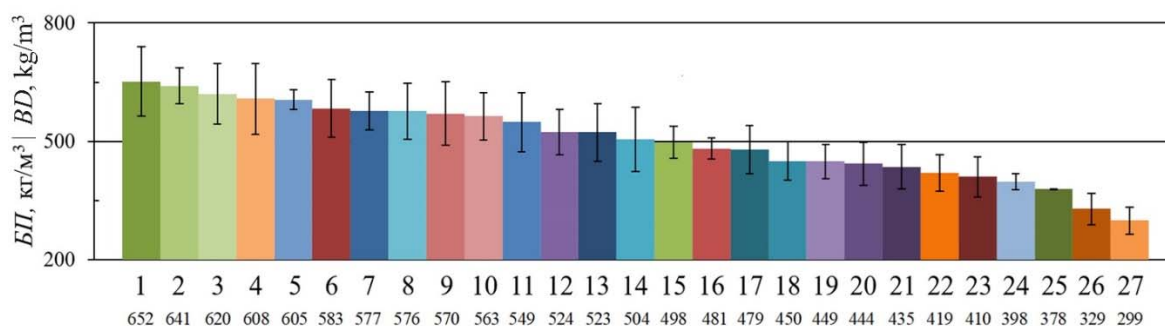


Рисунок 3. Диаграмма распределения 27 лесообразующих лиственных видов Евразии по величине БП стволов в коре: 1 – *Fagus sylvatica* L.; 2 – *Quercus rubra* L.; 3 – *Carpinus betulus* L.; 4 – *Quercus robur* L.; 5 – *Quercus castaneifolia* C.A.Mey.; 6 – *Fagus orientalis* Lipsky; 7 – *Fagus crenata* Blume; 8 – *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.; 9 – *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.; 10 – *Fraxinus excelsior* L.; 11 – *Betula maximowicziana* Regel; 12 – *Betula pendula* Roth; 13 – *Populus deltoides* W.Bartram ex Marshall; 14 – *Populus alba* L.; 15 – *Betula costata* Trautv.; 16 – *Betula platyphylla* Sukaczew; 17 – *Populus ×euramericana* (Dode) Guinier; 18 – *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.; 19 – *Quercus serrata* Murray; 20 – *Tilia cordata* Mill.; 21 – *Populus tremula* L.; 22 – *Alnus incana* (L.) Moench; 23 – *Populus euphratica* Olivier; 24 – *Fraxinus mandshurica* Rupr.; 25 – *Populus laurifolia* Ledeb.; 26 – *Populus trichocarpa* Torr. & A.Gray ex Hook.; 27 – *Populus davidiana* (Dode) Hultén

Figure 3. Diagram of the distribution of 27 forest-forming deciduous species of Eurasia by the value of the BD of stems above bark: 1 – *Fagus sylvatica* L.; 2 – *Quercus rubra* L.; 3 – *Carpinus betulus* L.; 4 – *Quercus robur* L.; 5 – *Quercus castaneifolia* C.A.Mey.; 6 – *Fagus orientalis* Lipsky; 7 – *Fagus crenata* Blume; 8 – *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.; 9 – *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.; 10 – *Fraxinus excelsior* L.; 11 – *Betula maximowicziana* Regel; 12 – *Betula pendula* Roth; 13 – *Populus deltoides* W.Bartram ex Marshall; 14 – *Populus alba* L.; 15 – *Betula costata* Trautv.; 16 – *Betula platyphylla* Sukaczew; 17 – *Populus ×euramericana* (Dode) Guinier; 18 – *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.; 19 – *Quercus serrata* Murray; 20 – *Tilia cordata* Mill.; 21 – *Populus tremula* L.; 22 – *Alnus incana* (L.) Moench; 23 – *Populus euphratica* Olivier; 24 – *Fraxinus mandshurica* Rupr.; 25 – *Populus laurifolia* Ledeb.; 26 – *Populus trichocarpa* Torr. & A.Gray ex Hook.; 27 – *Populus davidiana* (Dode) Hultén

Примечание: по оси абсцисс – величина БП (кг/м³) стволов в коре.

Note: on the abscissa axis – the value of BD (kg/m³) of stems above bark.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

### Заключение

Таким образом, разработаны регрессионные модели смешанного типа (табл. 3) для БП запаса стволовой древесины в коре шести лиственных родов и двух видов, специфичные по регионам и видам в пределах региона. Структура модели смешанного типа позволяет выполнить ранжирование (гармонизацию) регионов по БП стволов при условии их равенства по возрасту и густоте древостоев.

Выполнены два ранжирования по величине БП стволов в коре, а именно, ранжирование регио-

нов в пределах шести родов и двух видов и видоспецифичное ранжирование, согласно которому максимальным значением характеризуются бук европейский (*F. sylvatica* L.) ( $652 \pm 87,7$  кг/м³) и дуб красный (*Q. rubra* L.) ( $641 \pm 45,6$  кг/м³) и минимальным – тополь волосистоплодный (*P. trichocarpa* Torr. & A.Gray ex Hook.) ( $329 \pm 39,5$  кг/м³) и тополь Давида (*P. davidiana* (Dode) Hultén) ( $299 \pm 34,4$  кг/м³). Полученные модели и ранжирования видов по величине БП запаса стволовой древесины в коре могут быть использованы при расчетах углеродного пула в лиственных древостоях Евразии по данным инвентаризации лесов.



## Список литературы

1. Мелехов В. И. Качество древесины сосны в культурах / В. И. Мелехов, Н. А. Бабич, С. А. Корчагов // Архангельск : Изд-во АГТУ, 2003. – 110 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21534714>.
2. Проблемы оценки биопродуктивности лесов в аспекте биогеографии: 2. Модели смешанных эффектов / В. А. Усольцев, С. О. Р. Шубаири, Дж. А. Дар [и др.] // Эко-потенциал. – 2018. – № 1 (21). – С. 9–26. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32819636>.
3. Усольцев В. А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии : монография : электронная база данных / В. А. Усольцев. – 4-е изд., доп. – Екатеринбург : Ботанический сад УрО РАН, УГЛТУральский государственный лесотехнический университет, 2023. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ozgnkk>.
4. Усольцев В. А. Географические закономерности изменения базисной плотности древесины и коры лесообразующих пород Евразии / В. А. Усольцев, И. С. Цепордей // Сибирский лесной журнал. – 2022. – № 3. – С. 59–68. – DOI: <http://doi.org/10.15372/SJFS20220307>.
5. Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев / В. А. Усольцев. – Красноярск : Изд-во Красноярского ун-та, 1985. – 192 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22825234>.
6. Усольцев В. А. Плотность древесины и коры деревьев на климатических градиентах Евразии / В. А. Усольцев, И. С. Цепордей // Лесоведение. – 2023. – № 3. – С. 217–227. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0024114823030117>.
7. Хох А. Н. Анализ аномалий структуры и размера годичных колец в сосняках мшистых и багульниковых / А. Н. Хох // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 2. – С. 212–230. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/24>.
8. Цепордей И. С. Биологическая продуктивность лесообразующих видов в климатическом контексте Евразии : монография / И. С. Цепордей ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук. – Екатеринбург, 2023. – 467 с. – ISBN 978-5-8295-0860-9. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54303060>.
9. Цепордей И. С. О проблематике квалитетических исследований биомассы лесов Евразии / И. С. Цепордей, В. А. Усольцев // Леса России и хозяйство в них. – 2021. – № 3 (78). – С. 15–24. – DOI: <https://doi.org/10.51318/FRET.2021.30.50.002>.
10. Aboveground biomass basic density of hardwoods tree species / R. Petráš, J. Mecko, D. Krupová, A. Pažitný // Wood Research. – 2020. – Vol. 65. – No. 6. – 1001–1012 pp. – DOI: <http://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.6.10011012>.
11. Anatomical and physico-mechanical properties of *Acacia auriculiformis* wood in relation to age and soil in Benin, West Africa / M. Tonouéwa, P. Langbour, S. S. H. Biaou [et al.] // European Journal of Wood and Wood Products. – 2020. – Vol. 78. – No. 4. – 745–756 pp. – DOI: <http://doi.org/10.1007/s00107-020-01540-x>.
12. Assessing intra-annual growth dynamics in climatically contrasting years, sites, and tree species using dendrometers and wood anatomical data / A. Debel, Z. Foroozan, M. Häusser [et al.] // Frontiers in Forests and Global Change. – 2024. – No. 7. – Art. 1342413. – DOI: <http://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1342413>.
13. Characterisation of wood quality of *Eucalyptus nitens* plantations and predictive models of density and stiffness with site and tree characteristics / M. Balasso, M. Hunt, A. Jacobs, J. O'Reilly-Waps // Forest Ecology and Management. – 2021. – No. 491. – 1–14 pp. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118992>.
14. Consequences of Vertical Basic Wood Density Variation on the Estimation of Aboveground Biomass with Terrestrial Laser Scanning / M. Demol, K. Calders, S. Moorthy [et al.] // Trees - Structure and Function. – 2021. – No. 35. – 671–684 pp. – DOI: <http://doi.org/10.1007/s00468-020-02067-7>.
15. Drought responsiveness in two Mexican conifer species forming young stands at high elevations / E. D. Vivar-Vivar, M. Pompa-García, D. A. Rodríguez-Trejo [et al.] // Forest Systems. – 2021. – Vol. 30. – No. 3. – Art. e012. – DOI: <http://doi.org/10.5424/fs/2021303-18371>.

16. Effect of stem rot on wood basic density, carbon, and nitrogen content of living deciduous trees in hemiboreal forests / J. Liepiņš, I. Jaunslaviete, K. Liepiņš [et al.] // *Silva Fennica*. – 2023. – Vol. 57. – No. 3. – Art. 23040. – DOI: <http://doi.org/10.14214/sf.23040>.

17. Estimation of total extractive content of wood from planted and native forests by near infrared spectroscopy / L. T. Mancini, F. M. G. Ramalho, P. F. Trugilho, P. R. G. Hein // *iForest – Biogeosciences and Forestry*. – 2021. – Vol. 14. – No. 1. – 18–25 pp. – DOI: <http://doi.org/10.3832/ifer3472-013>.

18. Evaluating basic density calibrations based on NIR spectra recorded on the three wood faces and subject to different mathematical treatments / E. A. Amaral, L. M. Dos Santos, P. R. G. Hein [et al.] // *New Zealand Journal of Forestry Science*. – 2021. – Vol. 51. – No. 2. – 1–7 pp. – DOI: <http://doi.org/10.33494/nzjfs512021x100x>.

19. Genetic influence on components of wood density variation in white spruce / A. Soro, P. Lenz, M. Hassegawa [et al.] // *Forestry*. – 2022. – No. 95. – 153–216 pp. – DOI: <http://doi.org/10.1093/forestry/cpab044>.

20. Growth-ring boundaries of tropical tree species: Aiding delimitation by long histological sections and wood density profiles / M. T. Quintilhan, L. C. Santini, D. R. O. Rodriguez [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2021. – Vol. 69. – 1–10 pp. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125878>.

21. Improper data practices erode the quality of global ecological databases and impede the progress of ecological research / S. P. Augustine, I. Bailey-Marren, K. T. Charton [et al.] // *Global Change Biology*. – 2024. – No. 30. – Art. e17116. – DOI: <http://doi.org/10.1111/gcb.17116>.

22. Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components / A. Billard, R. Bauer, F. Mothe [et al.] // *Annals of Forest Science*. – 2020. – No. 77. – Art. 103. – DOI: <http://doi.org/10.1007/s13595-020-00999-1>.

23. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species / S. M. G. Rocha, G. B. Vidaurre, J. E. M. Pezzopane [et al.] // *Forest Ecology and Management*. – 2020. – Vol. 473. – No. 6. – Art. 118290. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118290>.

24. MacFarlane D. W. Functional Relationships Between Branch and Stem Wood Density for Temperate Tree Species in North America / D. W. MacFarlane // *Frontiers in Forests and Global Change*. – 2020. – Vol. 3. – No. 63. – DOI: <http://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00063>.

25. Marden M. Species-specific basic stem-wood densities for twelve indigenous forest and shrubland species of known age, New Zealand / M. Marden, S. Lambie, L. Burrows // *New Zealand Journal of Forestry Science*. – 2021. – Vol. 51. – Art. 1. – DOI: <http://doi.org/10.33494/nzjfs512021x121x>.

26. Measuring the tensile strain of wood by visible and near-infrared spatially resolved spectroscopy / T. Ma, T. Inagaki, M. Yoshida [et al.] // *Cellulose*. – 2021. – Vol. 28. – No. 17. – 10787–10801 pp. – DOI: <http://doi.org/10.1007/s10570-021-04239-1>.

27. Modeling of radial growth curves and radial variation of basic density in *Chamaecyparis obtusa* planted in two progeny test sites / Y. Takahashi, F. Ishiguri, M. Matsushita [et al.] // *Journal of Wood Science*. – 2024. – Vol. 70. – No. 2. – DOI: <http://doi.org/10.1186/s10086-023-02116-y>.

28. Nygård R. Stem basic density and bark proportion of 45 woody species in young savanna coppice forests in Burkina Faso / R. Nygård, B. Elfving // *Annals of Forest Science*. – 2000. – No. 57. – 143–153 pp. – DOI: <http://doi.org/10.1051/forest:2000165>.

29. Prediction of the basic density of tropical woods by near-infrared spectroscopy / D. T. Medeiros, R. R. Melo, P. H. G. Cademartori [et al.] // *Cerne*. – 2023. – Vol. 29. – Art. e-103262. – DOI: <http://doi.org/10.1590/01047760202329013262>.

30. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in southeastern Peru / L. A. P. Cahuana, E. A. G. Piña, G. P. Tuesta, M. Tomazello-Filho // *Cerne*. – 2023. – No. 29. – Art. e-103143. – DOI: <http://doi.org/10.1590/01047760202329013143>.

31. Radial variations of broad-sense heritability in wood properties and classification of load-deflection curves in static bending for six half-sib families of *Chamaecyparis obtuse* / Y. Takahashi, F. Ishiguri, I. Nezu [et al.] // *Journal of Wood Science*. – 2022. – No. 68. – Art. 24. – DOI: <http://doi.org/10.1186/s10086-022-02030-9>.
32. Rates of Stemwood Carbon Accumulation Are Linked to Hydroclimate Variability in Mexican Conifers / M. Pompa-García, E. D. Vivar-Vivar, E. A. Rubio-Camacho, J. J. Camarero // *Forests*. – 2023. – No. 14. – Art. 1381. – DOI: <http://doi.org/10.3390/f14071381>.
33. Sample preparation protocol for wood and phloem formation analyses / P. Prislan, E. M. Del Castillo, G. Skoberne [et al.] // *Dendrochronologia*. – 2022. – No. 73. – Art. 125959. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125959>.
34. Similar importance of inter-tree and intra-tree variations in wood density observations in Central Europe / H. Yang, K. Stereńczak, Z. Karaszewski, N. Carvalhais // *Biogeosciences*. – 2024. – DOI: <http://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2691>.
35. The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones / S. E. L. Costa, R. C. do Santos, G. B. Vidaurre [et al.] // *Forest Ecology and Management*. – 2020. – No. 458. – Art. 117807. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117807>.
36. Variation in the Basic Density of the Tree Components of Gray Alder and Common Alder / K. Liepinš, J. Liepinš, J. Ivanovs [et al.] // *Forests*. – 2023. – No. 14. – Art. 135. – DOI: <http://doi.org/10.3390/f14010135>.
37. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood / O. E. Sseremba, P. Mugabi, A. Y. Banana [et al.] // *Journal of Forestry Research*. – 2020. – No. 32. – 503–512 pp. – DOI: <http://doi.org/10.1007/s11676-020-01141-7>.
38. Variations in heartwood formation and wood density as a function of age and plant spacing in a fast-growing eucalyptus plantation / L. M. H. Santos, M. N. F. Almeida, J. G. M. Silva [et al.] // *Holzforschung*. – 2021. – No. 75. – 979–988 pp. – DOI: <http://doi.org/10.1515/hf-2020-0215>.
39. Wood Basic Density Assessment of Eucalyptus Genotypes Growing under Contrasting Water Availability Conditions / J. P. Elissetche, R. M. Alzamora, Y. Espinoza [et al.] // *Forests*. – 2024. – No. 15. – Art. 185. – DOI: <http://doi.org/10.3390/f15010185>.
40. Wood density variations of *E. urophylla* clone among growth sites are related to climate / M. N. F. Almeida, G. B. Vidaurre, J. L. Louzada [et al.] // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2023. – No. 53. – 343–353 pp. – DOI: <http://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0037>.

### References

1. Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. *Kachestvo drevesiny sosny v kul'turah* [Quality of pine wood in crops]. Arkhangelsk, AGTU Publishing House, 2003. 110 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21534714> (in Russian).
2. Usoltsev V.A., Shubairi S.O.R., Dar Dzh.A., Tsepordey I.S., Chasovskikh V.P., Kolchin K.V. *Problemy otsenki bioproduktivnosti lesov v aspekte biogeografii: 2. Modeli smeshannykh effektov* [Problems of assessing forest bioproductivity in the aspect of biogeography: 2. Mixed effects models]. *Eko-potentsial* [Eco-potential], 2018, no.1(21). pp. 9-26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32819636> (in Russian).
3. Usoltsev V.A. *Biomassa i pervichnaya produktsiya lesov Evrazii* [Biomass and primary production of Eurasian forests]: monograph: electronic database, 4th augmented electronic edition. *Ekaterinburg, Botanicheskiy sad UrO RAN. Uralskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskiy universitet* [Yekaterinburg, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ural State Forest Engineering University], 2023. Available at: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (accessed 9 March 2024) (in Russian).
4. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. *Geograficheskiye zakonomernosti izmeneniya bazisnoy plotnosti drevesiny i kory lesoobrazuyushchikh porod Evrazii* [Geographical patterns of changes in the basic density of wood and bark of forest-forming species in Eurasia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2022, no.3. pp. 59-68. doi: 10.15372/SJFS20220307 (in Russian).

5. Usoltsev V.A. *Modelirovaniye struktury i dinamiki fitomassy drevostoyev* [Modeling the structure and dynamics of phytomass of forest stands]. Krasnoyarsk, *Izdatelstvo Krasnoyarskogo universiteta* [Krasnoyarsk University Press], 1985. 192 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22825234> (in Russian).
6. Usoltsev V.A., Tsepordey I.S. *Plotnost drevesiny i kory derevev na klimaticheskikh gradientah Evrazii* [Density of wood and bark of trees on climatic gradients of Eurasia]. *Lesovedenie* [Forestry], 2023, no.3. pp. 217-227. doi: 10.31857/S0024114823030117 (in Russian).
7. Khokh A.N. *Analiz anomalij struktury i razmera godichnyh kolec v sosnyakah mshistykh i bagulnikovyykh* [Analysis of anomalies in the structure and size of annual rings in mossy and ledum pine forests]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], 2023, vol. 13, no. 4(52), part 2. pp. 212-230. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/24 (in Russian).
8. Tsepordey I.S. *Biologicheskaya produktivnost lesoobrazuyushchikh vidov v klimaticheskoy kontekste Evrazii: monografiya* [Biological productivity of forest-forming species in the climatic context of Eurasia: monograph]. *Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossiyskoy Federatsii. Botanicheskiy sad Uralskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk* [Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. Ekaterinburg, 2023. 467 p. – ISBN 978-5-8295-0860-9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54303060> (in Russian).
9. Tsepordey I.S., Usoltsev V.A. *O problematike kvalimetricheskikh issledovaniy biomassy lesov Evrazii* [On the problems of studying forest biomass qualimetry in Eurasia]. *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih* [Forests of Russia and Their Management], 2021, no. 3(78), pp. 15-24. doi: 10.51318/FRET.2021.30.50.002 (in Russian).
10. Petráš R., Mecko J., Krupová D., Pažitný A. Aboveground biomass basic density of hardwoods tree species. *Wood Research*, 2020, vol. 65, no. 6, pp. 1001-1012. doi: 10.37763/wr.1336-4561/65.6.10011012.
11. Tonouéwa M., Langbour P., Biaou S.S.H., Assede E., Guibal D., Clément K.A., Kounouhewa B. Anatomical and physico-mechanical properties of *Acacia auriculiformis* wood in relation to age and soil in Benin, West Africa. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2020, vol. 78, no. 4. pp. 745–756. doi: 10.1007/s00107-020-01540-x.
12. Debel A., Foroozan Z., Häusser M., Raspe S., Bräuning A. Assessing intra-annual growth dynamics in climatically contrasting years, sites, and tree species using dendrometers and wood anatomical data. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2024, no. 7, art. 1342413. doi: 10.3389/ffgc.2024.1342413.
13. Balasso M., Hunt M., Jacobs A., O'Reilly-Waps J. Characterisation of wood quality of *Eucalyptus nitens* plantations and predictive models of density and stiffness with site and tree characteristics. *Forest Ecology and Management*, 2021, no. 491. pp. 1-14. doi: 10.1016/j.foreco.2021.118992.
14. Demol M., Calders K., Moorthy S., den Bulcke J.V., Verbeeck H., Gielen B. Consequences of Vertical Basic Wood Density Variation on the Estimation of Aboveground Biomass with Terrestrial Laser Scanning. *Trees – Structure and Function*, 2021, no. 35. pp. 671-684. doi: 10.1007/s00468-020-02067-7.
15. Vivar-Vivar E.D., Pompa-García M., Rodríguez-Trejo D.A., Leyva-Ovalle A., Wehenkel C., Carrillo-Parra A., Moreno-Anguiano O. Drought responsiveness in two Mexican conifer species forming young stands at high elevations. *Forest Systems*, 2021, vol. 30, no. 3, art. e012. doi: 10.5424/fs/2021303-18371.
16. Liepins J., Jaunslaviete I., Liepins K., Jansone L., Matisons R., Lazdiņš A., Jansons A. Effect of stem rot on wood basic density, carbon, and nitrogen content of living deciduous trees in hemiboreal forests. *Silva Fennica*, 2023, vol. 57, no. 3, art. 23040. doi: 10.14214/sf.23040.
17. Mancini L.T., Ramalho F.M.G., Trugilho P.F., Hein P.R.G. Estimation of total extractive content of wood from planted and native forests by near infrared spectroscopy. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2021, vol. 14, no. 1, pp. 18-25. doi: 10.3832/ifer3472-013.
18. Amaral E.A., Santos L.M.D., Hein P.R.G., Costa E.V.S., Rosado S., Trugilho P.F. Evaluating basic density calibrations based on NIR spectra recorded on the three wood faces and subject to different mathematical treatments. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2021, vol. 51, no. 2, pp. 1-7. doi: 10.33494/nzjfs512021x100x.

19. Soro A., Lenz P., Hassegawa M., Roussel J.R., Bousquet J., Achim A. Genetic influence on components of wood density variation in white spruce. *Forestry*, 2022, no. 95, pp. 153-216. doi: 10.1093/forestry/cpab044.
20. Quintilhan M.T., Santini L.C., Rodriguez D.R.O., Guillemot J., Cesilio G.H.M., Legoas R.C., Nouvellon Y., Filho M.T. Growth-ring boundaries of tropical tree species: Aiding delimitation by long histological sections and wood density profiles. *Dendrochronologia*, 2021, vol. 69, pp. 1-10. doi: 10.1016/j.dendro.2021.125878.
21. Augustine S.P., Bailey-Marren I., Charton K.T., Kiel N.G., Peyton M.S. Improper data practices erode the quality of global ecological databases and impede the progress of ecological research. *Global Change Biology*, 2024, no. 30, art. e17116. doi: 10.1111/gcb.17116.
22. Billard A., Bauer R., Mothe F., Jonard M., Colin F., Longuetaud F. Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components. *Annals of Forest Science*, 2020, no. 77, art. 103. doi: 10.1007/s13595-020-00999-1.
23. Rocha S.M., Vidaure G.B., Pezzopane J.E.M., Almeida M.N.F., Carneiro R.L., Campoe O., Scolforo H.F., Alvares C.A., César J., Xavier A.C., Figura M.A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. *Forest Ecology and Management*, 2020, vol. 473, no. 6, art. 118290. doi: 10.1016/j.foreco.2020.118290.
24. MacFarlane, D.W. Functional Relationships Between Branch and Stem Wood Density for Temperate Tree Species in North America. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2020, vol. 3, no. 63. doi: 10.3389/ffgc.2020.00063.
25. Marden M., Lambie S., Burrows L. Species-specific basic stem-wood densities for twelve indigenous forest and shrubland species of known age, New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2021, vol. 51, art. 1. doi: 10.33494/nzjfs512021x121x.
26. Te M., Inagaki T., Yoshida M., Ichino M., Tsuchikawa S. Measuring the tensile strain of wood by visible and near-infrared spatially resolved spectroscopy. *Cellulose*, 2021, vol. 28, no. 17, pp. 10787-10801. doi: 10.1007/s10570-021-04239-1.
27. Takahashi Y., Ishiguri F., Matsushita M., Nezu I., Ohshima J., Yokota S., Tamura A., Tsubomura M., Takahashi M. Modeling of radial growth curves and radial variation of basic density in *Chamaecyparis obtusa* planted in two progeny test sites. *Journal of Wood Science*, 2024, vol. 70, no. 2. doi: 10.1186/s10086-023-02116-y.
28. Nygård R., Elfving B. Stem basic density and bark proportion of 45 woody species in young savanna coppice forests in Burkina Faso. *Annals of Forest Science*, 2000, no. 57, pp. 143-153. doi: 10.1051/forest:2000165.
29. Medeiros D.T., de Melo R.R., Cademartori P.H.G., Batista F.G., Mascarenhas A.R.P., Scatolino M.V., Hein P.R.G. Prediction of the basic density of tropical woods by near-infrared spectroscopy. *Cerne*, 2023, vol. 29, art. e-103262. doi: 10.1590/01047760202329013262.
30. Cahuana L.A.P., Piña E.A.G., Tuesta G.P., Tomazello-Filho M. Radial variation of wood density and fiber morphology of two commercial species in a tropical humid forest in southeastern Peru. *Cerne*, 2023, no. 29, art. e-103143. doi: 10.1590/01047760202329013143.
31. Takahashi Y., Ishiguri F., Nezu I., Endo R., Kobayashi S., Tanabe J., Matsushita M., Ohshima J., Yokota S. Radial variations of broad-sense heritability in wood properties and classification of load-deflection curves in static bending for six half-sib families of *Chamaecyparis obtusa*. *Journal of Wood Science*, 2022, no. 68, art. 24. doi: 10.1186/s10086-022-02030-9.
32. Pompa-García M., Vivar-Vivar E.D., Rubio-Camacho E.A., Camarero J.J. Rates of Stemwood Carbon Accumulation Are Linked to Hydroclimate Variability in Mexican Conifers. *Forests*, 2023, no. 14, art. 1381. doi: 10.3390/f14071381.
33. Prislán P., Del Castillo E.M., Skoberne G., Špenko N., Gricar J. Sample preparation protocol for wood and phloem formation analyses. *Dendrochronologia*, 2022, no. 73, art. 125959. doi: 10.1016/j.dendro.2022.125959.
34. Yang H., Stereńczak K., Karaszewski Z., Carvalhais N. Similar importance of inter-tree and intra-tree variations in wood density observations in Central Europe. *Biogeosciences*, 2024. doi: 10.5194/egusphere-2023-2691.

35. Costa S.E.L., Do Santos R.C., Vidaurre G.B. The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management*, 2020, no. 458, art. 117807. doi: 10.1016/j.foreco.2019.117807.

36. Liepinš K., Liepinš J., Ivanovs J. Variation in the Basic Density of the Tree Components of Gray Alder and Common Alder. *Forests*, 2023, no. 14, art. 135. doi: 10.3390/f14010135.

37. Sseremba O.E., Mugabi P., Banana A.Y. Variation of basic density, calorific value and volumetric shrinkage within tree height and tree age of Ugandan grown *Eucalyptus grandis* wood. *Journal of Forestry Research*, 2020, no. 32, pp. 503-512. doi: 10.1007/s11676-020-01141-7.

38. Santos L.M.H., Almeida M.N.F., Silva J.G.M. Variations in heartwood formation and wood density as a function of age and plant spacing in a fast-growing eucalyptus plantation. *Holzforschung*, 2021, no. 75, pp. 979-988. doi: 10.1515/hf-2020-0215.

39. Elissetche J.P., Alzamora R.M., Espinoza Y. Wood Basic Density Assessment of Eucalyptus Genotypes Growing under Contrasting Water Availability Conditions. *Forests*, 2024, no. 15, art. 185. doi: org/10.3390/f15010185

40. Almeida M.N.F., Vidaurre G.B., Louzada J.L. Wood density variations of *E. urophylla* clone among growth sites are related to climate. *Canadian Journal of Forest Research*, 2023, no. 53, pp. 343-353. doi: 10.1139/cjfr-2022-0037.

### Сведения об авторах

✉ *Усольцев Владимир Андреевич* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (БС УрО РАН), ул. 8 марта, 202а, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация; профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>, e-mail: [Usoltsev50@mail.ru](mailto:Usoltsev50@mail.ru).

*Плюха Николай Иванович* – аспирант кафедры лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>, e-mail: [nikcskript@mail.ru](mailto:nikcskript@mail.ru).

*Цепордей Иван Степанович* – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук» (БС УрО РАН), ул. 8 марта, 202а, г. Екатеринбург, 620144, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>, e-mail: [ivan.tsepordey@yandex.ru](mailto:ivan.tsepordey@yandex.ru).

### Information about the authors

✉ *Vladimir A. Usoltsev* – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Research Scientist, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 8 Marta str., 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; Professor of the Department of Forest Taxation and Forestry, Ural State Forestry Engineering University, Siberian tract, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>, e-mail: [Usoltsev50@mail.ru](mailto:Usoltsev50@mail.ru).

*Nikolay I. Plyukha* – Postgraduate Student of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forestry Engineering University, Siberian tract, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>, e-mail: [nikcskript@mail.ru](mailto:nikcskript@mail.ru).

*Ivan S. Tsepordey* – Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 8 Marta str., 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>, e-mail: [ivan.tsepordey@yandex.ru](mailto:ivan.tsepordey@yandex.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/8>


УДК 630\*3 : 621.866-82






## Кинематический и динамический анализ механизма подъема манипулятора сортиментовоза, оснащенного гидромеханическим демпфером, на основе методов Эйлера и Рунге-Кутты

Дмитрий С. Богданов<sup>1</sup>, bogdanov\_s69@mail.ru  <http://orcid.org/0000-0003-4179-8189>

Алина В. Попикова<sup>1</sup>, poalinka@mail.ru  <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>

Иван Д. Евсиков<sup>1</sup>, evsfan1997@gmail.com  <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>

Сергей К. Попиков<sup>1</sup>, sergpopikov@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

Александр А. Полумиско<sup>2</sup> , alex-polumisko@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0003-2900-7919>

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

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

Представлен анализ исследований кинематики и динамики рабочих процессов манипуляторов технологических машин. Целью исследования является снижение динамической нагруженности и повышение производительности лесного манипулятора путем кинематического и динамического анализа механизма подъема стрелы, оснащенного гидромеханическим демпфером. Разработаны расчетные схемы для механизма подъема стрелы и демпфера. Основой исследования служит математическая модель, описывающая кинематику и динамику подъема стрелы с учетом действия дополнительного демпфера. Модель включает в себя уравнения, описывающие взаимодействие основных параметров системы, таких как угол подъема стрелы, давление в напорном трубопроводе и ход плунжера демпфера. Решение системы уравнений представлено с использованием приближенного метода Эйлера и разложения в ряд Маклорена, а полученные функции анализируются с точки зрения их зависимости от времени и других ключевых параметров. В статье подробно описан метод расчета коэффициентов и численное решение по методу Рунге-Кутты, включая чувствительность модели к изменениям параметров. Задача решена в системе компьютерной алгебры Maxima. Особое внимание уделено анализу влияния малых параметров на поведение системы, что демонстрируется на графиках зависимостей ключевых переменных от времени. В заключении формулируются основные выводы, подчеркивающие значимость введения дополнительного демпфера для снижения динамической нагруженности и повышения производительности погрузочно-разгрузочных работ лесного манипулятора.

**Ключевые слова:** манипулятор, гидропривод, демпфер, механизм подъема стрелы, математическая модель, расчетные схемы, погрузочно-разгрузочные работы, угол подъема стрелы, давление в напорном трубопроводе, ход плунжера демпфера.

**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:** Кинематический и динамический анализ механизма подъема манипулятора сортировочного, оснащенного гидромеханическим демпфером, на основе методов Эйлера и Рунге-Кутты / Д. С. Богданов, А. В. Попикова, И. Д. Евсиков, С. К. Попиков, А. А. Полумиско // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 127–143. – Библиогр.: с. 139–143 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/8>.

*Поступила* 13.05.2024. *Пересмотрена* 03.06.2024. *Принята* 04.06.2024. *Опубликована онлайн* 17.06.2024.



### **Kinematic and dynamic analysis of the lifting mechanism of a sorting truck manipulator equipped with a hydromechanical damper based on Euler and Runge-Kutta methods**

**Dmitry S. Bogdanov**<sup>1</sup>, bogdanov\_s69@mail.ru  <http://orcid.org/0000-0003-4179-8189>

**Alina V. Popikova**<sup>1</sup>, poalinka@mail.ru  <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>

**Ivan D. Evsikov**<sup>1</sup>, evsfan1997@gmail.com  <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>

**Sergei K. Popikov**<sup>1</sup>, sergpopikov@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

**Alexander A. Polumisko**<sup>2</sup> , alex-polumisko@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0003-2900-7919>

<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 pl., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation*

#### **Abstract**

An analysis of research into the kinematics and dynamics of work processes of technological machine manipulators is presented. The aim of the study is to reduce the dynamic load and increase the productivity of the forest manipulator by kinematic and dynamic analysis of the boom lifting mechanism equipped with a hydromechanical damper. Calculation schemes for the boom and damper lifting mechanism have been developed. The research is based on a mathematical model describing the kinematics and dynamics of boom lifting, taking into account the action of an additional damper. The model includes equations describing the interaction of the main system parameters, such as the boom lifting angle, pressure in the pressure line and the stroke of the damper plunger. The solution of the system of equations is presented using the approximate Euler method and Maclaurin series expansion, and the obtained functions are analyzed in terms of their dependence on time and other key parameters. The article describes in detail the method of calculating coefficients and the numerical solution using the Runge-Kutta method, including the sensitivity of the model to changes in parameters. The problem is solved in the Maxima computer algebra system. Special attention is paid to the analysis of the influence of small parameters on the behavior of the system, which is demonstrated on the graphs of the dependencies of key variables on time. In conclusion, the main conclusions are formulated, emphasizing the importance of introducing an additional damper to reduce dynamic loading and increase the productivity of loading and unloading operations of the forest manipulator.

**Keywords:** *manipulator, hydraulic drive, damper, boom lifting mechanism, mathematical model, calculation schemes, loading and unloading operations, boom lifting angle, pressure in the pressure pipeline, damper plunger stroke, manipulator operation optimization.*

**Funding:** This study received no external funding.

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

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



**For citation:** Bogdanov D. S., Popikova A. V., Evsikov I. D., Popikov S. K., Polumisko A. A. (2024) Kinematic and dynamic analysis of the lifting mechanism of a sorting truck manipulator equipped with a hydromechanical damper based on Euler and Runge-Kutta methods. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 127–143 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/8>.

*Received* 13.05.2024. *Revised* 03.06.2024. *Accepted* 04.06.2024. *Published online* 17.06.2024.

## Введение

В лесном комплексе Российской Федерации актуальной проблемой является импортозамещение и разработка эффективной техники. Важными критериями эффективности лесотранспортных машин манипуляторного типа являются надежность и энергоемкость, а одним из решений может быть разработка демфирующих узлов, которые позволяют снизить динамическую нагруженность и повысить производительность технологического оборудования.

С.А. Голякевич и А.Р. Гороновский (2019 и 2024) [1-2] разработали имитационную модель мехатронной системы форвардера «Амкодор-2661-01» с учетом параметров гидросистемы и технологического оборудования. Рабочие режимы исследовались при максимальной частоте вращения гидронасоса 2800 об/мин, номинальной частоте 2400 об/мин и минимальной – 500 об/мин, при этом давление в гидросистеме находилось в пределах 31...40 МПа.

А.А. Тарбеев (2019) [3] отмечает, что при эксплуатации лесных гидроманипуляторов в зимнее время из-за высоких динамических нагрузок теряют свою работоспособность гибкие трубопроводы (РВД) (29,7–56%) и уплотнения гидроцилиндров (14,0–24,1%).

Е.В. Авдеева и В.Ф. Полетайкин (2020) [4] исследовали рабочие режимы гидропривода манипулятора лесопогрузчика методом математического моделирования. На основании решения неоднородных дифференциальных уравнений движения стрелы и поворотной колонны, а также расходов рабочей жидкости получены расчетные формулы для определения усилий на штоках гидроцилиндров, скоростей и ускорений стрелы и колонны. Установлено, что скорость движения штока гидроцилиндра поворота колонны изменяется от 0,042 м/с до 0,0691 м/с, а усилия на штоке от 329114 до 562621 Н.

И.А. Лагерева и А.В. Лагерева (2019) [5-7] предложили методику моделирования рабочих процессов кранов-манипуляторов при совмещении движений стрелы и рукояти. Установлено, что время подъема стрелы составляет 6,6 с, а рукояти – 3,4 с, при этом на выходе из гидронасоса наблюдается ярко выраженный колебательный процесс в давлении рабочей жидкости из-за частого срабатывания предохранительного клапана, среднее давление стабилизируется на уровне 12,5 МПа. Рассмотрены вопросы устойчивости технологических машин с применением выносных аутригеров с опорными винтовыми или гидравлическими домкратами. Составлена компьютерная программа для определения перемещения, скорости и ускорения звеньев манипулятора, а также давления и расхода рабочей жидкости. Выполнено моделирование совместного поворота стрелы и колонны крана манипулятора с учетом инерционных нагрузок. Также рассмотрены совместное движение стрелы и рукояти в пределах углов до 60 градусов и при силе тяжести груза 7,5 кН, приведены графики зависимости усилий на штоках гидроцилиндров от углов поворотов стрелы и рукояти. При одновременном начале совместных движений звеньев наблюдается отсутствие колебательных процессов и гидравлических параметров.

В работе Е.Н. Власова и др. (2022) [8] представлены результаты исследований динамики и устойчивости следящего гидропривода манипулятора лесной машины на основе линеаризованных моделей. Получено выражение для определения устойчивости следящего гидропривода и амплитудно-фазовых частотных характеристик гидропривода лесных машин.

П.И. Попиков и др. (2019) [9] разработали имитационную модель, с помощью которой на виртуальном стенде получены кинематические и динамические параметры при совмещении движения

трех звеньев манипулятора в различных комбинациях. Это позволяет получить оптимальную траекторию подъема груза с наименьшими энергозатратами и максимальной производительностью. Рассмотрены вопросы устойчивости технологических машин с применением выносных аутригеров с опорными винтовыми или гидравлическими домкратами.

В работе А.А. Макарова и С.Е. Худяковой (2021) [10] использована динамическая модель робота типа SCARA с избирательной податливостью руки. Рассмотрены вопросы определения кинематических параметров (длин плеч, углов поворота приводов) по заданной рабочей зоне робота с помощью решения системы уравнений для расчета координат на ЭВМ с использованием метода Лагранжа-Эйлера, при котором удаляются взаимосвязи с весовыми коэффициентами, меньшими расчетных погрешностей.

В работе Д.Р. Богданова и О.В. Даринцева (2019) [11] представлена методика проектирования манипуляторов с управляемым изгибом звеньев под различными углами для роботов. Разработаны программы для обоснования кинематики отдельных звеньев на базе однородной матрицы преобразования в виде произведения частных матриц для каждого элемента звена.

В.А. Крамарь и др. (2019) [12] на основе исходных данных сформировали базу знаний, соответствующую изменению углов поворота звеньев манипулятора-робота для решения задачи определения требуемой траектории движения.

Т.А. Шевелевой (2020) [13] даны рекомендации применения пакетов прикладных программ для компьютерного моделирования кинематики механизмов в системе САПР. Для кривошипно-ползунного механизма сделан расчет кинематики с помощью геометрического метода.

В статье М.В. Кузьмина и А.А. Казначеева (2023) [14] произведен математический анализ кинематики и динамики манипулятора-робота. Разработана кинематическая схема шестизвального манипулятора. Составлена матрица однородного преобразования. Решена обратная задача динамики и кинематики манипулятора.

В работах А.И. Телегина и М.В. Носикова (2022) [15-16] предлагается более простое аналитическое решение уравнений динамики манипуляторов с вращательными кинематическими сочленениями в квазискоростях, представленных в символьном виде с явно выраженными геометрическими, кинематическими и инерционными параметрами. Это способствует более быстрому проектированию манипуляторов с заданными свойствами.

В работе М.И. Михайлова и А.В. Шевченко (2022) [17] проведена оптимизация траектории манипулятора-робота RA605. Решена обратная задача кинематики и динамики методом обратных преобразований. Разработана траектория движения схвата робота с использованием кубических полиномов по выбранным узловым точкам. Одновременно проводилась оптимизация по критерию минимизации времени движения с учётом рабочего пространства и ограничений по кинематическим параметрам.

С.М. Ситник и Ту Раин (2023) [18] представили методологию сбора данных для обучения обратной динамической модели манипулятора. Разработали параметрическую физическую модель манипулятора на основании метода Денавита-Хартенберга. Сначала задаётся рабочая зона манипулятора, для генерации которой используется полиномиальная функция третьей степени. На каждом шаге изменения углов поворота манипулятора, скорости и ускорения производится расчёт необходимых значений.

В статье А.В. Нелюбовой (2022) [19] разработана математическая модель рабочего процесса робота с трехзвенным манипулятором. Выбрана траектория движения звена манипулятора в виде прямой с наклонным коэффициентом. Математическая модель представлена с помощью уравнения Лагранжа второго рода и решена в среде Simulink MATLAB. Получены кинематические и динамические параметры, которые обеспечивают перемещение захвата по заданной траектории.

В статьях А.В. Долматова и С.А. Васильева (2022) [20-21] представлена разработка интеллектуальных мехатронных модулей SCARA-манипулятора четвертого поколения. Программный комплекс позволяет создавать кинематические пары

между звеньями манипулятора для точной имитации моментов сил и углов поворота различных звеньев манипулятора.

В работе О.Р. Дорняк и др. (2023) [22] рассматривается статическое нагружение силового гидропривода манипулятора в критических режимах опрокидывания лесотранспортной машины в поперечной плоскости. Для изучения состояния равновесия при различных положениях опорно-поворотного устройства использованы уравнения в обобщенных координатах. Получены расчетные зависимости давления в гидроцилиндрах манипулятора, аутриггеров, стрелы и рукояти при различных углах наклона рамы опорно-поворотного устройства. Записаны аналитические выражения для определения усилий в гидроцилиндрах, которые позволяют прогнозировать критические режимы манипуляторов, при которых происходит опрокидывание лесотранспортной машины в поперечной плоскости.

В работе А.А. Волошкина и др. (2023) [23] представлена математическая модель манипулятора Delta. Получены кинематические и динамические характеристики манипулятора с использованием 3D моделирования. Программа позволяет построить траекторию движения поднимаемого инструмента для обработки детали при различных углах поворота звеньев. Получены графики зависимости скоростей, которые находились в пределах от 502 мм/с до 5920 мм/с, и ускорений от времени для приводных звеньев, а также параллелограммного механизма и подвижной рамы. Максимальное значение момента в приводных шарнирах в момент времени 0,24 секунды достигает значения 68,1 Н·м.

Анализ результатов исследований способов снижения динамической нагруженности и повышение производительности технологических машин манипуляторного типа показал, что кинематика и динамика гидроприводов с демпфирующими устройствами исследованы недостаточно.

*Целью исследования* является снижение динамической нагруженности и повышение производительности лесного манипулятора путем совершенствования кинематики и динамики гидропривода механизма подъема стрелы, оснащенного гидромеханическим демпфером.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследования*

В качестве объекта исследования нами выбран механизм подъема стрелы манипулятора с подключением в гидропривод нового гидромеханического демпфера (рис. 1), защищенного патентом на изобретение [24]. Новизна предлагаемого гидромеханического демпфера заключается в том, что плунжер выполнен пустотелым и подпружинен с двух сторон, корпус демпфера снабжен резьбовыми пробками, выполненными заодно с обратными клапанами, шайбами для регулирования объема полостей демпфера, которые сообщены с полостями гидроцилиндра привода грузоподъемной стрелы через регулируемые дроссели, встроенные в корпус демпфера. Такое техническое решение с малой массой пустотелого плунжера обеспечивает быстрое срабатывание гидромеханического демпфера при высоких частотах и амплитудах колебаний давления рабочей жидкости в переходных режимах.

Функционирование механизма подъема груза обеспечивается подачей рабочей жидкости насосом 2 из гидробака 1 через распределитель 3 по гибким трубопроводам 5 или 6 к гидроцилиндру 4.

Принцип действия нового гидромеханического демпфера 16 (см. рис. 1) с облегченным пустотелым плунжером 19 основан на быстром действии перепуска объема рабочей жидкости равного объему деформации гибких рукавов высокого давления 5 и 6 во время переходных процессов, между полостями 22 и 24 гидроцилиндра 4 через систему дроссельных отверстий, обратных клапанов 17 и 18 и регулируемых дросселей 23 и 25. Надо отметить, что объемы левой 20 и правой 21 полостей демпфера 16 должны быть равны объемам деформации гибких элементов гидропривода и регулируются за счет резьбовых пробок 26 и 27, а также регулировочных шайб 28 и 29. Пружины сжатия 20 и 21 обеспечивают возврат пустотелого плунжера 19 в среднее положение после его перемещения в ту или иную сторону под действием всплесков давления в гидролиниях 5 и 6 за счет инерционных сил, возникающих в переходных процессах в начале подъема груза, остановки и торможения стрелы.

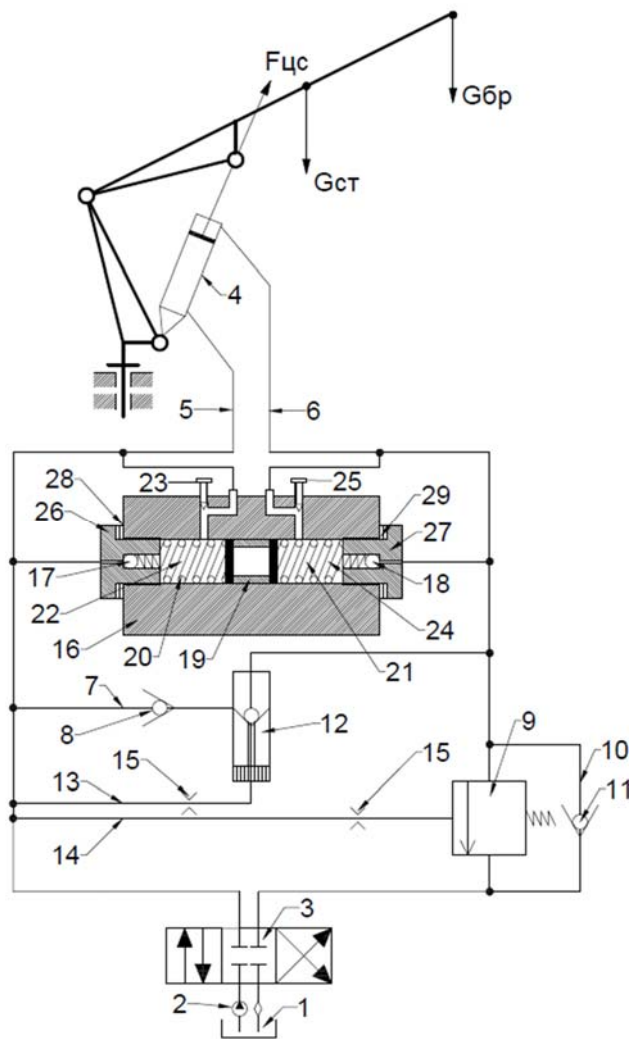


Рисунок 1 – Гидрокинематическая схема механизма подъема манипулятора с гидромеханическим демпфером  
Figure 1 – Hydrokinematic diagram of the manipulator lifting mechanism with an hydromechanical damper

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: authors' own composition

Предлагаемая конструкция механизма подъема имеет еще один резерв повышения производительности за счет редукционного клапана 9 с линией управления 14 и демпфером 15 и нормально закрытого управляемого клапана с линией управления 13 и демпфером 16, которые при подъеме легких грузов перепускает часть жидкости из штоковой полости гидроцилиндра 4 в поршневую полость, при этом увеличивается расход рабочей жидкости и соответственно скорость подъема легкого груза. Гидросистема также снабжена обратным клапаном 11 и гидрролинией 10.

Благодаря этим элементам гидропривода легкие грузы поднимаются на повышенных скоростях, что увеличивает производительность манипулятора при погрузочно-разгрузочных работах.

*Предметом исследования* является математическая модель процесса подъема стрелы с учетом подключения гидромеханического демпфера в гидропривод и теоретические зависимости кинематических и динамических характеристик.

Для анализа кинематики и динамики рабочих процессов составлены расчетные схемы механизма подъема стрелы (рис. 2) и демпфера (рис. 3).

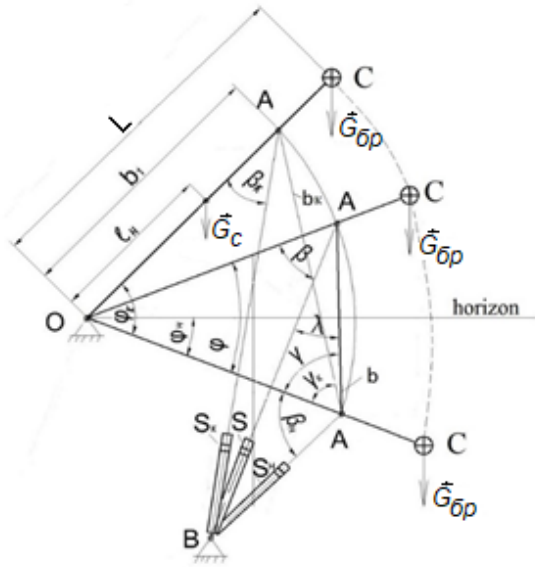


Рисунок 2 – К определению параметров механизма подъема аналитическим методом  
 Figure 2 – To determine the parameters of the lifting mechanism by the analytical method  
 Источник: Собственная композиция авторов  
 Source: Authors' own composition

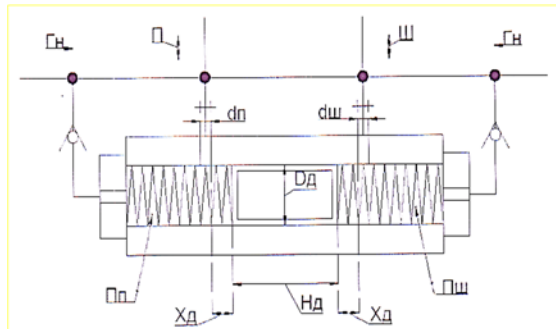


Рисунок 3 – К определению параметров демпфера аналитическим методом  
 Figure 3 – To determine the parameters of the damper by the analytical method  
 Источник: Собственная композиция авторов  
 Source: Authors' own composition

Разработана математическая модель подъема стрелы манипулятора с дополнительным демпфером:

$$\begin{cases} (J_{бр} + J_c) \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{\pi d_c^2 b_1 \sin \beta}{4} p - (G_{бр} L + G_c l_H) \cos \varphi, \\ Q = \frac{\pi d_c^2 b_1 \sin \beta}{4} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \mu \frac{\pi d_n^2}{4} \sqrt{\frac{2p}{\rho}} + a_y p + \frac{V_{сум}}{E_{ип}} \cdot \frac{dp}{dt}, \\ \frac{d^2 x_d}{dt^2} = \frac{1}{m_d} \left( p \frac{\pi d_n^2}{4} - c_n x_d - \frac{dx_d}{dt} k_d \right), \end{cases} \quad (1)$$

где

- $\varphi$  – угол подъема стрелы, рад;
- $p$  – текущее значение давления в напорном трубопроводе, Па;
- $x_d$  – ход плунжера демпфера, м;
- $t$  – время, с.

Остальные параметры обозначены на рис. 2 и 3 и в табл. 1.

Угол  $\beta$  является функцией угла  $\varphi$  и определяется из выражений

$$\begin{aligned} \beta &= \gamma - \lambda, \\ \lambda &= \arcsin \left( \frac{S_H}{S} \sin(\beta_H + \gamma) \right), \\ S^2 &= b^2 + S_H^2 - 2bS_H \cos(\beta_H + \gamma), \\ b &= 2b_1 \sin \left( \frac{\varphi}{2} \right), \\ \beta_H &= \arccos \left( \frac{b_k^2 + S_H^2 - S_k^2}{2b_k S_H} - \gamma_k \right), \\ b_k &= 2b_1 \sin \left( \frac{\varphi_k}{2} \right), \\ \gamma_k &= \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi_k}{2}, \\ \gamma &= \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2}, \end{aligned}$$

где

- $S_H$  – минимальная длина гидроцилиндра, м;
- $S_k$  – максимальная длина гидроцилиндра, м;
- $\varphi_H$  – начальное значение угла  $\varphi$ , м;
- $\varphi_k$  – конечное значение угла  $\varphi$ , м.

В системе (1) параметры  $\varphi$ ,  $p$ ,  $x_d$  являются искомыми функциями от времени  $t$ , которые задаются на временном промежутке  $[t_H, t_k] = [0; 15]$  с.

Поставим начально-краевую задачу:

$$\begin{aligned} \varphi(t_H) &= \varphi_H = -0.26, \\ \varphi(t_k) &= \varphi_k = 1.4, \\ p(t_H) &= \varepsilon, \\ x_d(t_H) &= 0, x_d(t_k) = (x_d)_k = 0.04, \end{aligned} \quad (2)$$

где через  $\varepsilon$  обозначен достаточно малый положительный параметр.

Для аналитического решения задачи нами использован аналог метода Эйлера, в котором каждая производная аппроксимируется разностными отношениями.

Введение малого параметра обусловлено тем, что функция  $\sqrt{p(t)}$  не дифференцируема в тех точках, в которых  $p(t)$  обращается в 0.

С целью упрощения машинных вычислений сделаем следующие допущения:

- 1) приблизим  $\pi \approx 3.14$ ;
- 2) выражение  $\sin \beta$  заменим эмпирической кубической функцией угла  $\varphi$ , равной

$$\delta(\varphi) = 0.05\varphi^3 - 0.13\varphi^2 - 0.4\varphi + 0.86.$$

Действительно, как видно из рис. 4, графики функций  $\sin \beta$  и  $\delta(\varphi)$  практически накладываются на всем отрезке  $[\varphi_n, \varphi_k]$ .

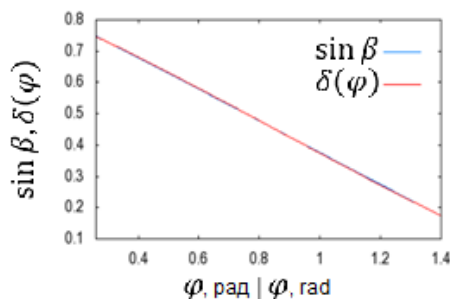


Рисунок 4 – Графики функций  $\sin \beta$  и  $\delta(\varphi)$

Figure 4 – Graphs of functions  $\sin \beta$  and  $\delta(\varphi)$

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: Authors' own composition

Введем обозначения:

$$A_1 = \frac{\pi d_c^2 b_1}{4(J_{бр} + J_c)}, A_2 = -\frac{G_{бр}L + G_c l_n}{J_{бр} + J_c},$$

$$B_1 = -\frac{a_y E_{пр}}{V_{сум}}, B_2 = -\mu \frac{\pi d_n^2}{4} \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, B_3 = -\frac{\pi d_c^2 b_1 E_{пр}}{4V_{сум}},$$

$$B_4 = \frac{q_n n_n E_{пр}}{V_{сум}},$$

$$C_1 = -\frac{k_d}{m_d}, C_2 = -\frac{c_n}{m_d}, C_3 = \frac{\pi d_n^2}{4m_d}$$

и перепишем систему (1), выделив старшие производные от искомых функций:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = A_1 p(t) \delta(t) + A_2 \cos(\varphi(t)), \\ \frac{dp}{dt} = B_1 p(t) + B_2 \sqrt{p(t)} + B_3 \delta(t) \frac{d\varphi}{dt} + B_4, \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{d^2 x_d}{dt^2} = C_1 \frac{dx_d}{dt} + C_2 x_d(t) + C_3 p(t). \quad (4)$$

Сначала рассмотрим систему из первых двух уравнений этой системы. Для решения заменим искомые функции их разложениями в многочлен Маклорена в окрестности точки  $t = t_n = 0$  до третьей степени  $t$  включительно:

$$\varphi(t) = \varphi(0) + \frac{\varphi'(0)}{1!} t + \frac{\varphi''(0)}{2!} t^2 + \frac{\varphi'''(0)}{3!} t^3, \quad (5)$$

$$p(t) = p(0) + \frac{p'(0)}{1!} t + \frac{p''(0)}{2!} t^2 + \frac{p'''(0)}{3!} t^3. \quad (6)$$

Значения  $\varphi^{(i)}(0)$ ,  $p^{(i)}(0)$ ,  $i = 0, 1, 2, 3$ , вычисляются по следующей схеме.

Пусть  $\varphi'(0)$  – параметр, который надлежит вычислить.

1. Из первого уравнения системы (3) находим  $\varphi''(0)$ , взяв  $t = 0$ ;

2. Из второго уравнения этой системы, взяв  $t = 0$ , находим  $p'(0)$ ;

3. Продифференцировав первое уравнение, зная  $\varphi''(0)$ , находим  $\varphi'''(0)$ ;

4. Продифференцировав второе уравнение, зная  $\varphi''(0)$ , находим  $p''(0)$ ;

5. Подставляем найденные значения  $\varphi^{(i)}(0)$ ,  $i = 2, 3$ , в (5); из уравнения  $\varphi(15) = \varphi_k$  находим  $\varphi'(0)$ .

Тем самым, функция  $\varphi(t)$  найдена.

6. Продифференцировав второе уравнение дважды, зная  $p^{(i)}(0)$ ,  $\varphi^{(i)}(0)$ ,  $i = 0, 1, 2$ , и  $\varphi'''(0)$ , находим  $p'''(0)$ ;

7. Подставляем найденные значения  $p^{(i)}(0)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , в (2.6).

Тем самым, функция  $p(t)$  найдена.

Задача решена в системе компьютерной алгебры Maxima с учетом входных данных в таблице 1. Отметим, что числовые значения округляются до тысячных.

Обозначив

$$D_1 = 0.966A_2, D_2 = 0.954A_1 B_4,$$

$$D_3 = 0.911A_1 B_3 + 0.257A_2,$$

получим

$$\varphi(t) = \varphi_n + \frac{t}{1!} \varphi'(0) + \frac{t^2}{2!} D_1 + \frac{t^3}{3!} (D_2 + D_3 \varphi'(0)).$$

Решив уравнение  $\varphi(15) = \varphi_k$ , находим  

$$\varphi'(0) = \frac{2(\varphi_k - \varphi_H) - 1125D_2 - 225D_1}{1125D_3 + 30}$$

Далее, обозначим

$$\begin{aligned} D_5 &= B_4 + 0.954B_3\varphi'(0), \\ D_6 &= 0.5B_2B_4 + 0.477B_2B_3\varphi'(0), \\ D_7 &= B_1B_4 + 0.922A_2B_3 + 0.5B_2^2 + 0.954B_1B_3\varphi'(0) \\ &\quad - 0.322(\varphi'(0))^2, \\ D_8 &= -0.25B_2B_4^2 - 0.239B_2B_3\varphi'(0), \\ D_9 &= 0.5B_1B_2B_4 - 0.25B_1B_2 + 0.477B_1B_2B_3\varphi'(0), \\ D_{10} &= -0.25B_2^2, \\ D_{11} &= 0.88A_1A_2B_3B_4 + B_1^2B_4 + 0.922A_2B_1B_3 \\ &\quad + 0.5B_1B_2^2 + \\ &\quad + [0.84A_1A_2B_3^2 + 0.954B_1^2B_3 + 0.237A_2^2B_3 \\ &\quad - 0.934A_2B_3]\varphi'(0) - \\ &\quad - 0.322B_1B_3(\varphi'(0))^2 + 0.176A_2B_3(\varphi'(0))^3. \end{aligned}$$

Тогда, исключив слагаемые с  $\sqrt{\varepsilon}$ ,  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon^2$ , оказывающее малое влияние, получим

$$\begin{aligned} p(t) &= p(t, \varepsilon) = \frac{t}{1!}D_5 + \frac{t^2}{2!}\left(D_6 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} + D_7\right) + \\ &\quad + \frac{t^3}{3!}\left(D_8 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^3}} + D_9 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} + D_{10} \cdot \frac{1}{\varepsilon} + D_{11}\right). \end{aligned}$$

Далее, будем обозначать эту функцию

$$p(t) = P_1t + P_2(\varepsilon)t^2 + P_3(\varepsilon)t^3,$$

где

$$\begin{aligned} P_1 &= D_5, \\ P_2(\varepsilon) &= D_6 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} + D_7, \\ P_3(\varepsilon) &= D_8 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^3}} + D_9 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} + D_{10} \cdot \frac{1}{\varepsilon} + D_{11}. \end{aligned}$$

В итоге получается формула для определения функции  $\varphi(t)$

$$\varphi(t) = -0.26 + 0.128t - 0.869t^2 + 0.058t^3.$$

Далее, вычислим ход плунжера  $x_d(t)$ , решив уравнение (4) с условиями (2). Неоднородная часть найдена выше.

Пусть

$$C_1^2 + 4C_2 > 0.$$

Обозначим

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{C_1 + \sqrt{C_1^2 + 4C_2}}{2}, v_2 = \frac{C_1 - \sqrt{C_1^2 + 4C_2}}{2}, \\ P_4(t, \varepsilon) &= \frac{C_3}{\sqrt{C_1^2 + 4C_2}} \cdot \\ &\cdot \left\{ P_1 \left[ \frac{e^{v_1 t} - v_1 t - 1}{v_1^2} - \frac{e^{v_2 t} - v_2 t - 1}{v_2^2} \right] + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ P_2(\varepsilon) \left[ \frac{2e^{v_1 t} - v_1^2 t^2 - 2v_1 t - 2}{v_1^3} - \frac{2e^{v_2 t} - v_2^2 t^2 - 2v_2 t - 2}{v_2^3} \right] + \\ &+ P_3(\varepsilon) \left[ \frac{6e^{v_1 t} - v_1^3 t^3 - 3v_1^2 t^2 - 6v_1 t - 6}{v_1^4} - \frac{6e^{v_2 t} - v_2^3 t^3 - 3v_2^2 t^2 - 6v_2 t - 6}{v_2^4} \right] \left. \right\} \end{aligned}$$

Тогда методом вариации постоянных получим решение

$$\begin{aligned} x_d(t) &= \frac{(x_d)_H \cdot e^{15v_2} - (x_d)_K + P_4(15, \varepsilon)}{e^{15v_2} - e^{15v_1}} e^{v_1 t} + \\ &+ \frac{-(x_d)_H \cdot e^{15v_1} + (x_d)_K - P_4(15, \varepsilon)}{e^{15v_2} - e^{15v_1}} e^{v_2 t} + P_4(t, \varepsilon). \end{aligned}$$

Подставив значения из табл. 1, находим

$$\begin{aligned} x_d(t) &= -6.2 \cdot 10^{17} e^{-0.15t} + 7.259 \cdot 10^{17} e^{-4999.85t} \\ &\quad + 5.955 \cdot 10^{13} t^3 - \\ &\quad - 1.191 \cdot 10^{15} t^2 + 1.588 \cdot 10^{16} t - 1.059 \cdot 10^{17}. \end{aligned}$$

Получено приближение точного решения, но из-за сильной нелинейности перед первой производной, это решение расходится от реального по мере удаления от начальной точки ( $t = 0$ ). Его можно улучшить, взяв количество  $n$  точек разбиения отрезка по времени очень большим. Отметим, что решение задачи очень чувствительно к изменению малого параметра из-за того, что он находится в знаменателях коэффициентов. А именно, при  $\varepsilon \rightarrow 0$  рост функции становится интенсивнее. Например, в точке  $t = 15$  с при  $\varepsilon = 0.1$  функция равна  $p(15) = 10^{20}$  (Па), а при  $\varepsilon = 10^{-30}$  она уже равна  $3.16 \cdot 10^{63}$  (Па).

Поэтому для решения таких задач рекомендуется использовать численный метод Рунге-Кутты.

### Результаты

Расчёт был произведён в программе MathCad с использованием метода Рунге-Кутты для решения системы дифференцированных уравнений второго порядка. В результате получен график изменения угла подъема стрелы (рис. 5). Статистические показатели угла подъема стрелы приведены в таблице 2. Анализ графика изменения угла подъема стрелы показал, что в начале угол имеет отрицательное значение при подъеме стрелы из крайнего нижнего положения до горизонтального, затем он монотонно возрастает примерно до 26 градусов.

Входные данные программы

Table 1

Program input data

	Параметр   Parameter	Интервал   Interval	Значение   Meaning
$t_k$	время на процесс поднятия, с   time for the lifting process, s		8
$\varphi_n$	начальное значение угла $\varphi$ , рад   initial value of angle $\varphi$ , rad		-0.26
$\varphi_k$	конечное значение угла $\varphi$ , рад   final value of angle $\varphi$ , rad		1.4
$(x_d)_k$	конечное положение хода плунжера, м   final position of the plunger stroke, m		0.05
$S_n$	минимальная длина гидроцилиндра, м   минимальная длина гидроцилиндра, м	1...1.5	1.4
$S_k$	максимальная длина гидроцилиндра, м   maximum length of hydraulic cylinder, m	1.8...2.3	2.2
$m_{бр}$	масса пачки бревен, кг   weight of a pack of logs, kg		884
$m_c$	масса стреловой группы, кг   mass of the boom group, kg		433
$J_{бр}$	момент инерции пачки бревен относительно точки O, кг·м <sup>2</sup>   moment of inertia of a stack of logs relative to point O, kg·m <sup>2</sup>		$J_{бр} = m_{бр}l^2 = 33435.09$
$J_c$	момент инерции стрелы относительно точки O, кг·м <sup>2</sup>   moment of inertia of the boom relative to point O, kg·m <sup>2</sup>		$J_c = m_c l^2 = 4830.37$
$G_{бр}$	сила тяжести пачки бревен в захвате, Н   gravity of a stack of logs in the grip, N		$G_{бр} = m_{бр}g = 8840$
$G_c$	сила тяжести стрелы, Н   boom gravity, N		$G_c = m_c g = 4330$
$d_c$	внутренний диаметр гидроцилиндра стрелы, м   internal diameter of the boom hydraulic cylinder, m		0.1
$b_1$	параметр, м   parameter, m		1
$L$	вылет манипулятора, м   manipulator reach, m		6.15
$l_n$	расстояние от точки O до центра масс стреловой группы, м   distance from point O to the center of mass of the boom group, m		3.34
$Q$	подача в единицу времени, м <sup>3</sup> /с   flow per unit time, m <sup>3</sup> /s		0.00133
$\mu$	коэффициент расхода   flow coefficient	0.7...0.8	0.75
$d_{др}$	диаметр отверстия дросселя, м   throttle hole diameter, m	0.001...0.003	0.002
$\rho$	плотность рабочей жидкости, кг/м <sup>3</sup>   working fluid density, kg/m <sup>3</sup>		800
$a_y$	коэффициент утечек в гидросистеме, м <sup>3</sup> /(Па·с)   leakage coefficient in the hydraulic system, m <sup>3</sup> /(Pa·s)		$2 \cdot 10^{-12}$



$K_p = \frac{V_{\text{сум}}}{E_{\text{пр}}}$	коэффициент податливости   compliance coefficient	$(0.9...3.3) \cdot 10^{-10}$	$2.1 \cdot 10^{-10}$
$m_d$	масса плунжера демпфера, кг   damper plunger mass, kg	0.01...0.03	0.02
$d_{\text{п}}$	диаметр плунжера демпфера, м   damper plunger diameter, m		0.08
$c_{\text{п}}$	жёсткость пружины демпфера, Н/м   damper spring stiffness, N/m	10...20	15
$k_d$	коэффициент вязкого трения плунжера демпфера, Н·с/м   coefficient of viscous friction of the damper plunger, N·s/m		1000

Источник: эмпирические данные, полученные авторами  
Source: empirical data obtained by the authors

Таблица 2

Статистические данные анализа угла подъема стрелы

Table 2

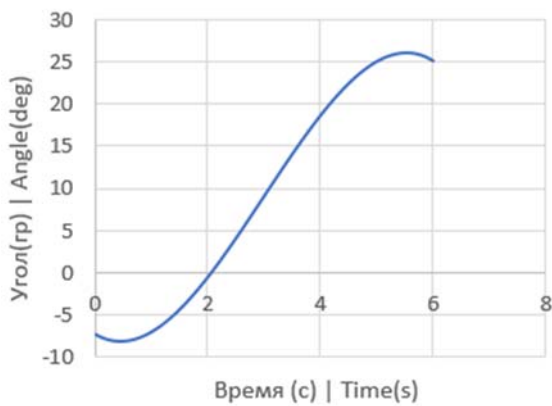


Рисунок 5 – График зависимости угла подъема стрелы φ от времени t

Figure 5 – Graph of elevation angle arrows φ versus time t

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: Authors' own composition

Для функции  $p(t)$  получим формулу

$$p(t) = p(t, \varepsilon) = 2 \cdot 10^6 t + (3.115 \cdot 10^7 - 2.890 \cdot 10^8 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}) t^2 + (2.238 \cdot 10^6 + 9.174 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} - 1.31 \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{\varepsilon} + 9.371 \cdot 10^{14} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon^3}}) t^3,$$

где  $\varepsilon = p(0)$  – достаточно малый положительный параметр.

Boom lift angle analysis statistics

Статистика. Изменение угла со временем   Statistics. Angle change over time	
Среднее   Average	8.997208735
Стандартная ошибка   Standard error	1.477695331
Медиана   Median	9.48977213
Стандартное отклонение   Standard deviation	14.85065428
Дисперсия выборки   Sample variance	220.5419327
Экссесс   Excess	-1.066113518
Асимметричность   Asymmetry	-0.217541743
Интервал   Interval	50.29329978
Минимум   Minimum	-18.01949837
Максимум   Maximum	32.2738014
Сумма   Sum	908.7180823
Счет   Check	101

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

В результате конечного расчёта по методу Рунге-Кутты получен график изменения давления рабочей жидкости в гидроцилиндре подъема стрелы (рис. 6). Статистические показатели давления в гидроцилиндре подъема стрелы приведены в табл. 3.

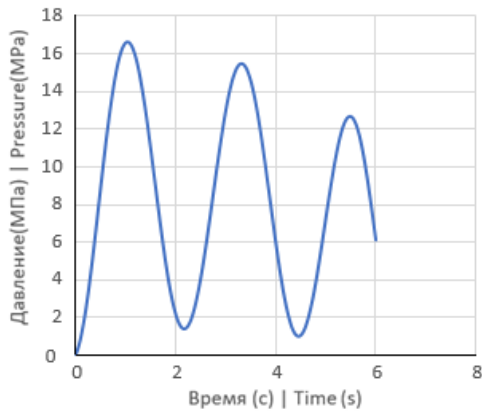


Рисунок 6 – График зависимости давления в напорном трубопроводе  $p$  от времени  $t$   
Figure 6 – Graph of pressure dependence in the discharge pipeline  $p$  versus time  $t$

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: Authors' own composition

Таблица 3

Статистические данные анализа давления рабочей жидкости при подъеме стрелы

Table 3

Statistical data of the analysis of working fluid pressure during boom lifting

Статистика. Изменение давления со временем   Statistics. Change in pressure over time	
Среднее   Average	8,404027974
Стандартная ошибка   Standard error	0,502495472
Медиана   Median	8,551971095
Стандартное отклонение   Standard deviation	5,050016992
Дисперсия выборки   Sample variance	25,50267162
Экцесс   Excess	-1,338211252
Асимметричность   Asymmetry	-0,019761651
Интервал   Interval	16,67097589
Минимум   Minimum	0
Максимум   Maximum	16,67097589
Сумма   Sum	848,8068254
Счет   Check	101
Уровень надежности (98,0%)   Reliability level (98,0%)	1.567636602

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

В результате конечного расчёта по методу Рунге-Кутты получен пример графика зависимости

хода плунжера демпфера от времени, представленный на рис. 7. За время полного хода плунжера обеспечивается перетечка между полостями гидроцилиндра объема жидкости, равного объему деформации упругих элементов гидропривода, и гасится всплеск давления при переходных режимах.

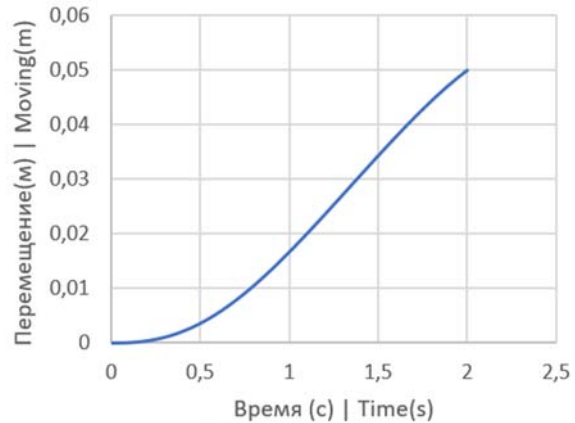


Рисунок 7 – График зависимости хода плунжера демпфера  $x_d$  от времени  $t$

Figure 7 – Graph of plunger stroke damper  $x_d$  versus time  $t$

Источник: Собственная композиция авторов  
Source: Authors' own composition

### Обсуждение

Поскольку основной целью исследования было снижение динамической нагруженности, на которую существенно влияет давление в гидроприводе, остановим свое внимание на обсуждении результатов, связанных с моделированием поведения давления в рассматриваемом процессе.

Анализ графика изменения давления рабочей жидкости в гидроцилиндре подъема стрелы (см. рис. 6) показал, что по сравнению с результатами работ С.А. Голякевича и А.Р. Гороновского [1-2] использование гидромеханического демпфера дает снижение максимального давления с 40 МПа до 16,67 МПа.

Как и в работах И.А. Лагерова и А.В. Лагерова [5-7] полученные нами результаты показывают колебательный характер изменения давления, однако, его среднее значение уменьшается примерно в 1,5 раза.

Интенсивность нарастания всплеска давления в начале подъема стрелы за счет влияния гидромеханического демпфера понизилась в 1.3–1.4 раза по сравнению с результатами ранее проведенных исследований механизма подъема стрелы без подключения демпфера [9].

Таким образом, полученные нами графики кинематических и динамических характеристик рабочих процессов предлагаемого гидропривода механизма подъема стрелы манипулятора автосортиметовоза по характеру изменения не противоречат ранее проведенным исследованиям других авторов без учета влияния гидромеханического демпфера.

### Выводы

1. Анализ результатов исследований способов снижения динамической нагруженности и повышения производительности технологических машин манипуляторного типа показал, что кинематика и динамика гидроприводов с демпфирующими устройствами исследованы недостаточно.

2. Разработан новый механизм подъема стрелы манипулятора с подключением в гидропривод гидромеханического демпфера. Внедрение дополнительного демпфера в гидропривод механизма подъема стрелы манипулятора позволяет значительно повысить эффективность и стабильность погрузочно-разгрузочных работ.

3. Разработана математическая модель, обеспечивающая глубокое понимание кинематики и динамики процессов, происходящих в системе, и демонстрирующая влияние дополнительного демпфера на ключевые параметры работы манипулятора, такие как угол подъема стрелы, давление в напорном трубопроводе и ход плунжера демпфера.

4. Анализ решений системы уравнений с использованием методов Эйлера и Рунге-Кутты подтверждает, что применение демпфера способствует снижению динамической нагруженности и улучшению кинематических показателей, что повышает производительность и надежность гидроманипуляторов лесотранспортных машин.

5. Полученные результаты не противоречат ранее проведенным исследованиям других авторов и могут быть использованы для дальнейшего усовершенствования конструкций манипуляторов, а также разработки новых технологий в области автоматизации погрузочно-разгрузочных работ.

### Список литературы

1. Голякевич С. А. Имитационное моделирование технологического оборудования форвардера как мехатронной системы. Труды БГТУ. Серия 1: лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (222). С. 174–180. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/30280>.
2. Голякевич С. А., Гороновский А. Р. Математическая модель динамики манипуляторов многооперационных лесозаготовительных машин. Труды БГТУ. Серия 1: лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 132–143. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/62730>.
3. Тарбеев А. А. Обеспечение надежности гидроприводов лесных машин совершенствованием методов и средств их диагностирования: автореф. канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 2019.
4. Авдеева Е. В., Полетайкин В. Ф. Исследование нагрузок на гидроцилиндры манипулятора. Хвойные бореальной зоны. 2020; 28 (5-6). С. 305–309. URL: <https://elibrary.ru/vknnjg>.
5. Лагерева А. В., Лагерева И. А. Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов : Моделирование рабочих процессов и проектирование элементов гидропривода. Брянск, 2019. 201 с. ISBN 978-5-9734-0319-5. URL: <https://elibrary.ru/vleqjy>.

6. Лагерев И. А., Лагерев А. В. Моделирование рабочих процессов в гидроприводе кранов-манипуляторов. Инновационное развитие подъемно-транспортной техники. материалы всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 74-77. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qwxevm&ysclid=lur3ln1yux185211858>.
7. Лагерев А. В., Лагерев И. А. Моделирование рабочих процессов в дроссельно-регулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при совместном движении звеньев. Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 1. С. 59-82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37289352&ysclid=lur3nj5m7g876441504>.
8. Власов Е. Н., Сергеевичев А. В., Добрынин Ю. А., Сергеевичев В. В. Анализ работы гидравлического манипулятора лесной машины с цикловой системой управления. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 238. С. 99-112. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.99-112>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48186417>.
9. Попиков П. И., Зеликов В. А., Яковлев К. А. [и др.] Имитационная модель автомобильного манипулятора, реализованная в среде САПР. Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 4 (36). С. 142–150. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/16. URL: <https://elibrary.ru/qwhvxf>.
10. Макаров А. А., Худякова С. Е. Разработка динамической модели робота типа scara с избирательной податливостью руки // Сборник научных трудов кафедры автоматки и промышленной электроники. Москва, 2021. С. 31-34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45772913&ysclid=lw08szlmz0747036875>.
11. Богданов Д. П., Даринцев О. В. Динамика (кинематика) звена манипулятора с управляемым изгибом. // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Сборник трудов. В 4-х томах. 2019. С. 528-530. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21162642>.
12. Крамарь В. А., Альчаков В. В., Крамарь О. А. Терминальный подход к построению управления антропоморфным манипулятором. Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2019. № 4 (8). С. 49-56. URL: <https://elibrary.ru/vsxsrq>.
13. Шевелева Т. А. Программные и инструментальные средства для компьютерного моделирования кинематики механизмов. Прикладная математика и фундаментальная информатика. 2020. Т. 7, № 2. С. 36-47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45747127>.
14. Кузьмина М. В., Казначеева А. А. Кинематический и динамический анализ движения робота манипуляционного типа. // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности. Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием. Москва, 2023. С. 182-187. URL: <https://elibrary.ru/ceaumw>.
15. Телегин А. И. Аналитическое решение первой задачи динамики манипуляторов. Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 1. С. 28–52. DOI: 10.14529/ctcr220103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48408894>.
16. Nosikov M. V., Telegin A. I. A New Type of the Manipulator Dynamics Equations for the Synthesis of Adaptive Pid Controller for Program Gripping. Journal of Computational and Engineering Mathematics. 2022. Vol. 9, No. 4. P. 26-33. DOI 10.14529/jcem220403. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50198249>.
17. Михайлов М. И., Шевченко А. В. Оптимизация траектории робота RA605 в составе роботизированного технологического комплекса для обработки дисков. Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2022. № 4 (91). С. 23-32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-traektorii-robota-ra605-v-sostave-robotizirovannogo-tehnologicheskogo-kompleksa-dlya-obrabotki-diskov>.
18. Ситник С. М., Ту Р. Эффективная методология сбора данных для обучения обратной динамической модели манипулятора на основе аналитического метода. I. Челябинский физико-математический журнал. 2023. Т. 8, Вып. 1. С. 140-145. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50415905>.
19. Нелюбова А. В. Исследование и анализ математической модели трехзвенного манипулятора. В книге: Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета. Волгоград, 2022. С. 414-415. URL: <https://elibrary.ru/rctqps>.

20. Долматов А. В., Исмагулов М. Е. Разработка интеллектуальных мехатронных модулей SCARA-манипулятора четвертого поколения на базе микроконтроллера ESP8266. Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2022. Т. 6. № 1. С. 131-136. Режим доступа: <https://elibrary.ru/gzwdwe>.
21. Vasilyev S. A., Mishin S. A., Limonov S. E., Nadezhkina O. A. Mechatronic module design of the control system of the braking mechanism and the clutch for transport and technological vehicles. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 981(3). P. 032007. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032007.
22. Дорняк О. Р., Маркова Л. В., Попиков С. К., Танчук П. В. Статическое нагружение силового гидропривода звеньев манипулятора лесотранспортной машины в критическом режиме. Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 2(50). С. 87–104. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/5>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54525084>.
23. Волошкин А. А., Рыбак Л. А., Скитова В. М., Ноздрачева А. В., Гапоненко Е. В. Создание трехмерной кинематической модели манипулятора Delta при помощи системы автоматизированного проектирования в NX. Робототехника и техническая кибернетика. Т. 11, № 1. Санкт-Петербург ЦНИИ РТК. 2023. С. 20-29. DOI: 10.31776/RTCJ.11103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50439476>.
24. Попиков П. И., Черных А. С., Богданов Д. С., Попиков С. К., Поздняков Е. В., Попикова А. В. Патент № 2789167 С1 Российская Федерация, МПК В66С 13/42. Гидропривод грузоподъемного механизма лесного манипулятора : № 2022119768 : заявл. 19.07.2022 : опубл. 30.01.2023 / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова". URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50267016>.

### References

1. Golyakevich S.A. Simulation modeling of forwarder technological equipment as a mechatronic system. Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources. 2019. No. 2 (222). pp. 174-180. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/30280>.
2. Golyakevich S.A., Goronovsky A.R. Mathematical model of the dynamics of manipulators of multi-operational forestry machines. Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources. 2024. No. 1 (276). pp. 132-143. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/62730>.
3. Tarbeev A.A. Ensuring the reliability of hydraulic drives of forestry machines by improving methods and means of diagnosing them: abstract. Ph.D. tech. Sciences. Yoshkar-Ola, 2019.
4. Avdeeva E.V., Poletaykin V.F. Study of loads on manipulator hydraulic cylinders. Conifers of the boreal zone. 2020; 28 (5-6). pp. 305–309. URL: <https://elibrary.ru/vknjng>.
5. Lagerev, A.V., Lagerev, I.A. Modern theory of manipulation systems of mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes: Modeling of work processes and design of hydraulic drive elements. Bryansk, 2019. 201 p. ISBN 978-5-9734-0319-5. URL: <https://elibrary.ru/vleqjy>.
6. Lagerev I.A., Lagerev A.V. Modeling of work processes in the hydraulic drive of manipulator cranes. Innovative development of lifting and transport equipment. materials of the All-Russian scientific and practical conference. 2019. pp. 74-77. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qwxevm&ysclid=lur3ln1yyx185211858>.
7. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Modeling of working processes in a throttle-controlled hydraulic drive of manipulation systems of mobile machines with joint movement of links. Scientific and technical bulletin of Bryansk State University. 2019. No. 1. pp. 59-82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37289352&ysclid=lur3nj5m7g876441504>.
8. Vlasov E.N., Sergeevichev A.V., Dobrynin Yu.A., Sergeevichev V.V. 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. No. 238. pp. 99-112. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.99-112>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48186417>.

9. Popikov P.I., Zelikov V.A., Yakovlev K.A., et al. Simulation model of an automobile manipulator, implemented in the CAD environment. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*. 2019. Vol. 9, No. 4 (36). pp. 142–150. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/16. URL: <https://elibrary.ru/qwhvkvf>.
10. Makarov A.A., Khudyakova S.E. Development of a dynamic model of a scara type robot with selective hand compliance. In the collection: *Collection of scientific works of the Department of Automation and Industrial Electronics*. Moscow, 2021. pp. 31-34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45772913&ysclid=lw08szlmz0747036875>.
11. Bogdanov D.R., Darintsev O.V. Dynamics (kinematics) of a manipulator link with controlled bending. In the collection: *XII All-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics. Collection of works*. In 4 volumes. 2019. pp. 528-530. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21162642>.
12. Kramar V.A., Alchakov V.V., Kramar O.A. Terminal approach to building control of an anthropomorphic manipulator. *Automation and measurements in mechanical instrument engineering*. 2019. No. 4 (8). pp. 49-56. URL: <https://elibrary.ru/vsxsrq>.
13. Sheveleva T.A. Software and tools for computer modeling of the kinematics of mechanisms. *Applied mathematics and fundamental computer science*. 2020. Vol. 7, No. 2. pp. 36-47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45747127>.
14. Kuzmina M.V., Kaznacheeva A.A. Kinematic and dynamic analysis of the movement of a manipulative-type robot. In the collection: *Innovative development of equipment and technologies in industry. Collection of materials from the All-Russian Scientific Conference of Young Researchers with International Participation*. Moscow, 2023. pp. 182-187. URL: <https://elibrary.ru/ceaumw>.
15. Telegin A.I. Analytical solution of the first problem of manipulator dynamics. *Bulletin of SUSU. Series "Computer technologies, control, radio electronics"*. 2022. Vol. 22, No. 1. pp. 28–52. DOI: 10.14529/ctcr220103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48408894>.
16. Nosikov M.V., Telegin A.I. A New Type of the Manipulator Dynamics Equations for the Synthesis of Adaptive Pid Controller for Program Gripping. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. 2022. Vol. 9, No. 4. pp. 26-33. DOI 10.14529/jcem220403. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50198249>.
17. Mikhailov M.I., Shevchenko A.V. Optimization of the trajectory of the RA605 robot as part of a robotic technological complex for processing disks. *Bulletin of Gomel State Technical University named after. BY. Sukhoi*. 2022. No. 4 (91). pp. 23-32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-traektorii-robotra605-v-sostave-robotizirovann>.
18. Sitnik S.M., Tu R. An effective data collection methodology for training an inverse dynamic model of a manipulator based on an analytical method. *I. Chelyabinsk Journal of Physics and Mathematics*. 2023. Vol. 8, Iss. 1. pp. 140-145. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50415905>.
19. Nelyubova A.V. Research and analysis of the mathematical model of a three-link manipulator. In the book: *Competition of scientific research works of students of the Volgograd State Technical University*. Volgograd, 2022. pp. 414-415. URL: <https://elibrary.ru/rctqps>.
20. Dolmatov A.V., Ismagulov M.E. Development of intelligent mechatronic modules for the fourth generation SCARA manipulator based on the ESP8266 microcontroller. *High-performance computing systems and technologies*. 2022. Vol. 6. No. 1. pp. 131-136. URL: <https://elibrary.ru/gzwdwe>.
21. Vasilyev S.A., Mishin S.A., Limonov S.E., Nadezhdina O.A. Mechatronic module design of the control system of the braking mechanism and the clutch for transport and technological vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 981(3). Art. No. 032007. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032007.
22. Dorniyak O.R., Markova L.V., Popikov S.K., Tanchuk P.V. Static loading of the power hydraulic drive of the manipulator links of a timber transport machine in critical mode. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*. 2023. Vol. 13, No. 2(50). pp. 87-104. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/5>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54525084>.

23. Voloshkin A.A., Rybak L.A., Skitova V.M., Nozdracheva A.V., Gaponenko E.V. Create a 3D kinematic model of the Delta manipulator using CAD in NX. Robotics and technical cybernetics. Vol. 11, No. 1. St. Petersburg Central Research Institute of RTK. 2023. pp. 20-29. DOI: 10.31776/RTCJ.11103. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50439476>.

24. Popikov P.I., Chernykh A.S., Bogdanov D.S., Popikov S.K., Pozdnyakov E.V., Popikova A.V. Patent No. 2789167 C1 Russian Federation, IPC B66C 13/42. Hydraulic drive of the lifting mechanism of the forestry manipulator: No. 2022119768: application. 07/19/2022: publ. 01/30/2023 / applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov". URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50267016>.

### Сведения об авторах

*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).

*Потикова 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).

*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).

*Потиков Сергей Константинович* – 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: <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, e-mail: [sergropikov@mail.ru](mailto:sergropikov@mail.ru).

✉ *Полумиско Александр Алексеевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», физический факультет, пл. Университетская, 1, Воронеж, Российская Федерация, 394018, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2900-7919>, e-mail: [alex-polumisko@mail.ru](mailto:alex-polumisko@mail.ru).

### Information about the authors

*Dmitry S. Bogdanov* – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4179-8189>, e-mail: [bogdanov\\_s69@mail.ru](mailto:bogdanov_s69@mail.ru).

*Alina V. Popikova* – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail: [poalinka@mail.ru](mailto:poalinka@mail.ru).

*Ivan D. Evsikov* – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-3388-3275>, e-mail: [evsfan1997@gmail.com](mailto:evsfan1997@gmail.com).

*Sergei K. Popikov* – postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, e-mail: [sergropikov@mail.ru](mailto:sergropikov@mail.ru).

*Alexander A. Polumisko* – master's student, Voronezh State University, Faculty of Physics, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2900-7919>, e-mail: [alex-polumisko@mail.ru](mailto:alex-polumisko@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/9>

УДК 630\*323.12



## Исследование эколого-экономических параметров работы машины Mounty-4000 на первичной транспортировке древесины в Республике Болгария

Сотир П. Глушков<sup>1</sup>, [sotirgluschkov@abv.bg](mailto:sotirgluschkov@abv.bg) <https://orcid.org/0000-0002-9089-417X>

Димитр И. Бояджиев<sup>1</sup>, [velbuzhd5@gmail.com](mailto:velbuzhd5@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0001-5716-0169>

Александр С. Черных<sup>2</sup>, [as-umu@mail.ru](mailto:as-umu@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-1601-420X>

Петр И. Попиков<sup>2</sup>, [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Дмитрий Н. Афоничев<sup>3</sup>, [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0001-9066-6428>

Виталий В. Абрамов<sup>2</sup> [vitali1980a@mail.ru](mailto:vitali1980a@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0001-8779-076X>

Денис А. Полукаров<sup>2</sup>, [aviatortut@mail.ru](mailto:aviatortut@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-5914-4928>

Станислав И. Савченко<sup>2</sup>, [savchenko.stas2020@yandex.ru](mailto:savchenko.stas2020@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>

<sup>1</sup>Институт лесоводства Болгарской академии наук, бульвар Кл. Охридски, 132, г София, 1756, Болгария

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В статье проведен анализ работы современной техники для выполнения первичной транспортировки древесины в горной местности, показавший перспективу использования мобильных канатных установок на базе грузовых автомобилей, оснащённых кареткой с дистанционным управлением, а также манипулятором с процессорной головкой для выполнения обработки деревьев или хлыстов, сортировки сортиментов и их погрузки на лесовозный транспорт. Целью представленной работы стало проведение теоретических и экспериментальные исследований эколого-экономических параметров работы Mounty 4000 на первичной транспортировке древесины в горной местности. В ходе проведенных теоретических исследований была проведена структуризация цикла работы «горного процессора» и в результате получена математическая зависимость затрат на ее эксплуатацию. По каждой составляющей времени цикла в ходе производственного эксперимента в условиях горной местности Болгарии были получены законы распределения и статистические характеристики их продолжительностей. Гипотеза нормальности распределения была подтверждена критерием Пирсона при заданном уровне значимости  $p=0.05$ . В ходе имитационного эксперимента была установлена зависимость повреждаемости оставляемых на лесосеке стволов деревьев от интенсивности рубки, густоты насаждения и расстояния подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната на трассе установки. Определен уровень значимости основных факторов влияния на общие затраты (по интенсивности рубки  $\beta/\alpha= 0,67$ ; ширине пасеки  $\beta/\alpha= 0,74$ ; запасу леса  $\beta/\alpha= 0,84$ ) и повреждаемость деревьев (по интенсивности рубки  $\beta/\alpha= 0,95$ ; запасу леса  $\beta/\alpha= 1,0$ ; ширине пасеки  $\beta/\alpha= 1,52$ ). Определены значения благоприятных областей наиболее значимых факторов влияния при уровне повреждаемости деревьев  $C_2$  ниже требуемых нормативов - 12 %. Результаты проведенных исследований рекомендуется использовать на стадии проектирования лесосечных работ для комплексной оценки функционирования техники с экономических и экологических позиций. Для этого разработана программа для ЭВМ «Программа для обоснования технологии и системы машин для лесозаготовок» (свидетельство о государственной регистрации № 2023662656).



**Ключевые слова:** заготовка древесины, лесовосстановительные работы, горные леса, первичная транспортировка древесины, горные процессоры, мобильные канатные установки, экологический ущерб, лесоводственный результат рубки, средооадающие технологии лесосечных работ, технико-экономическая эффективность функционирования техники.

**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:** Исследование эколого-экономических параметров работы машины MOUNTY-4000 на первичной транспортировке древесины в Республике Болгария / С. П. Глушков, Д. И. Бояджиев, А. С. Черных, П. И. Попиков, Д. Н. Афоничев, В. В. Абрамов, Д. А. Полукаров, С. И. Савченко // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 144–167. – Библиогр.: с. 162–166 (29 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/9>.

*Поступила* 18.03.2024. *Пересмотрена* 19.05.2024. *Принята* 23.05.2024. *Опубликована онлайн* 17.06.2024.

### Article


## Study of the environmental and economic parameters of the MOUNTY-4000 machine for primary wood transportation in the Republic of Bulgaria

Sotir P. Glushkov<sup>1</sup>, [sotirgluschkov@abv.bg](mailto:sotirgluschkov@abv.bg)  <https://orcid.org/0000-0002-9089-417X>

Dimitar I. Boyadzhiev<sup>1</sup>, [velbuzhd5@gmail.com](mailto:velbuzhd5@gmail.com)  <https://orcid.org/0000-0001-5716-0169>

Alexander S. Chernykh<sup>2</sup>, [as-umu@mail.ru](mailto:as-umu@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-1601-420X>

Petr I. Popikov<sup>2</sup>, [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Dmitry N. Afonichev<sup>3</sup>, [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-9066-6428>

Vitaly V. Abramov<sup>2</sup>  [vitali1980a@mail.ru](mailto:vitali1980a@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0001-8779-076X>

Denis A. Polukarov<sup>2</sup>, [aviatorfut@mail.ru](mailto:aviatorfut@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-5914-4928>

Stanislav I. Savchenko<sup>2</sup>, [savchenko.stas2020@yandex.ru](mailto:savchenko.stas2020@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-8740-4838>

<sup>1</sup>*Institute of Forestry of the Bulgarian Academy of Sciences, 132 Kl. Ohridski Boulevard, Sofia, 1756, Bulgaria*

<sup>2</sup>*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I", Michurina str., 1, Voronezh, 394087, Russian Federation*

### Abstract

The article analyzes the operation of modern technology for the primary transportation of wood in mountainous areas, showing the prospect of using mobile rope installations based on trucks equipped with a remote-controlled carriage, as well as a manipulator with a processor head for processing trees or logs, sorting assortments and their loading onto timber transport. The purpose of the presented work was to conduct theoretical and experimental studies of the environmental and economic parameters of the operation of MOUNTY 4000 in the primary transportation of wood in mountainous areas. In the course of the theoretical studies, the operating cycle of the "mining processor" was structured and, as a result, a mathematical dependence of the costs of its operation was obtained. For each component of cycle time, during a production experiment in the mountainous conditions of Bulgaria, distribution laws and statistical characteristics of their durations were obtained. The hypothesis of normal distribution was confirmed by the Pearson test at a given significance level of  $p=0.05$ . During the simulation experiment, the dependence of the damageability of tree trunks left in the cutting

area on the intensity of felling, the density of the planting and the distance of pulling the timber under the line of the supporting rope along the installation route was established. The level of significance of the main factors influencing the total costs (for felling intensity  $\beta/\alpha=0.67$ ; apiary width  $\beta/\alpha=0.74$ ; forest stock  $\beta/\alpha=0.84$ ) and damage to trees (for felling intensity  $\beta/\alpha=0.95$ ; forest stock  $\beta/\alpha=1.0$ ; apiary width  $\beta/\alpha=1.52$ ). The values of favorable areas of the most significant influencing factors were determined when the level of damage to C2 trees is below the required standards - 12%. The results of the conducted research are recommended to be used at the design stage of logging operations for a comprehensive assessment of the functioning of equipment from economic and environmental positions. For this purpose, a computer program has been developed "Program for justifying the technology and system of logging machines" (certificate of state registration No. 2023662656).

**Keywords:** *timber harvesting, reforestation works, mountain forests, primary transportation of wood, mining processors, mobile rope installations, environmental damage, forestry result of logging, environmental-sparing technologies of logging operations, technical and economic efficiency of equipment functioning.*

**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:** Glushkov S. P., Boyadzhiev D. I., Chernykh A. S., Popikov P. I., Afonichev D. N., Abramov V. V., Polukarov D. A., Savchenko S. I. (2024) Study of the environmental and economic parameters of the Mouny-4000 machine for primary wood transportation in the Republic of Bulgaria. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 144-167 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/9>.

*Received* 18.03.2024. *Revised* 19.05.2024. *Accepted* 23.05.2024. *Published online* 17.06.2024.

### Введение

В настоящее время значительные запасы древесины во многих странах мира находятся на горных склонах. В Болгарии на долю горных лесов приходится 24 % территории, в России – более 40 %.

По данным И.В. Григорьева и др. (2024) [7], при выполнении лесозаготовительных работ в горной местности наблюдается снижение производительности труда, а также увеличение ущерба для окружающей среды. В результате растут затраты на выполнение лесосечных и лесовосстановительных работ.

В работах И.Р. Шегельмана (2020) [28] отмечается, что по сравнению с другими операциями на лесосеке первичная транспортировка древесины в наибольшей степени определяет экономический результат рубки и ее лесоводственно-экологические последствия. Очень многое здесь зависит от технологии, техники, схем и параметров разработки лесосек.

Р. Кавалли (2019) [21] отмечает, что применение трелевочных тракторов в горной

местности характеризуется значительными затратами, повреждениями лесной среды, а также ограничениями в работе по причине потери сцепления движителя с почвогрунтом и потери устойчивости при уклоне в 15...20 градусов. Исправить такую ситуацию, по мнению Р.В. Франциска (2019) [23], можно с помощью специальной лебедки, установленной на тракторе, и троса, закрепляемого за пни и деревья, расположенные впереди по ходу движения.

А.В. Абузов и др. (2019-2023) [1-4] считают, что в будущем использование летательных аппаратов аэростатного типа для трелевки в горных условиях увеличится. Это позволит нормализовать процесс получения ценной древесины и восстановления лесов основными породами без нарушения лесной среды, особенно почв. Однако при всех достоинствах применения аэростатов на лесозаготовках, есть и недостатки. Во-первых, ветреная погода, которая часто встречается в горной местности, может приводить к парусности аэростата и таким образом сильно ограничивать его применение. Во-вторых,

грузоподъемность аэростата будет уменьшаться с увеличением высоты разрабатываемых лесосек, так как воздух там будет становиться все более разреженным.

Работа вертолетов на лесозаготовках в меньшей степени зависит от направления и силы ветра относительно аэростатов. При этом с экологической точки зрения вертолеты являются наиболее предпочтительным вариантом для использования на горном склоне, так как их влияние здесь на экосистему минимально. Однако на сегодняшний день их применение ограничивает экономический фактор. Только эксплуатационные затраты по топливу при использовании вертолета на первичной транспортировке древесины в зависимости от режима его работы (без учета заработной платы пилотов и расходов на амортизацию) могут достигать по данным С.Е. Рудова и др. (2021) [11] более 80 тыс. рублей в час. Кроме этого, управление вертолетом на лесозаготовках в горной местности – это сложная работа, поэтому могут возникать сложности с поиском свободных пилотов самого высокого уровня.

Проблемами воздушной трелевки древесины занимаются также в США, Канаде, Швеции, Италии, Франции, Германии и Норвегии, где в отдаленных горных лесах находятся большие запасы ценной древесины. Особое внимание там, по данным Г.Эрбера (2021) [22], как и в России, уделяется технологиям, которые в наименьшей степени оказывают влияние на экологическую сторону горных лесозаготовок и являются экономически оправданными.

П.Б. Рябухин и др. (2019-2023) [13-15] считают, что применение мобильных канатных установок позволяет осуществлять разработку горных лесосек при больших уклонах местности с меньшим количеством повреждений основных компонентов леса, не уступая существенно тракторам по производительности. При этом особое внимание заслуживает вопрос обоснования расстояния между трассами канатных установок, так как от величины данного параметра зависят производственные затраты и лесоводственно-экологический результат рубки. Уменьшение расстояния между трассами канатных установок означает уменьшение расстояния для подтрелевки, которое на крутых участках приводит

к значительному уменьшению повреждений оставшимся на лесосеке деревьям, что означает большие доходы от использования леса в длительной перспективе. Повреждаемость деревьев выражается в обдирах коры на стволах в местах их контакта с вытягиваемыми с полупасек предметами труда (деревья, хлысты) или собирающими их канатами. Увеличение расстояния между трассами канатных установок, кроме роста повреждаемости деревьев будущего приводит к увеличению протяженности траекторий вытягивания предметов труда с пасеки, в результате площадь повреждаемости почвы растет. Кроме этого, с увеличением ширины разрабатываемой полупасеки в каждую сторону от трассы канатной установки становится труднее формировать пачку лесоматериалов для транспортировки. Это приводит к повышению усталости у рабочих, увеличению риска несчастного случая, а также необходимости выделения дополнительного работника для чокеровки.

В настоящее время в Европе наиболее распространены канатные установки для разработки горных лесов компании Konrad Forsttechnik GmbH. С.П. Глушков и др. (2021) [24] считают, что особое внимание у данного производителя заслуживают современные мобильные канатные установки на базе грузовых автомобилей, оснащенных манипулятором с процессорной головкой для выполнения обрезки деревьев от сучьев и раскряжевки хлыстов, а также сортировки сортиментов и их погрузки на лесовозный транспорт. Их принято называть «горные процессоры» (рис. 1). Данная техника может работать, как отдельно, так и совместно с трелевочными тракторами (рис. 2), если позволяет уклон местности. При этом, второй вариант для склонов большой крутизны (свыше 20 градусов) в настоящее время не приемлем с экологических позиций, так как требует предварительную нарезку террас с помощью бульдозера. Практика показывает, что террасы в дальнейшем могут стать источниками ветровой и водной эрозии почвы.

Основные достоинства применения «горных процессоров» на лесозаготовках заключаются в следующем: можно быстро и качественно заготавливать древесину на участках с очень крутыми склонами или низкой несущей способностью грунтов;

тяжелая, трудоемкая и опасная работа с бензопилами на обрабатываемых операциях (обрезка стволов деревьев от сучьев или раскряжевка хлыстов на сортименты) становится полностью механизированной в производственном процессе лесосечных работ благодаря использованию процессорной головки; производительность крана-процессора при среднем диаметре получаемого сортимента 27...28 см становится больше в 5...9 раз относительно применения бензомоторного инструмента в зависимости от вида транспортируемой древесины (дерева или хлысты) и технологии работы на погрузочном пункте (очистка сучьев с последующей раскряжевкой или только раскряжевка хлыстов на сортименты).

На сегодняшний день в Болгарии частные лесозаготовительные компании используют на горных лесосеках три такие машины марки Mounty 4000 с процессорной головкой Woody H60 (табл. 1). Результаты их работы во многом определяют: тип лесозаготовительного массива, форма склона (вогнутый, выпуклый, прямой), уклон местности, конфигурация и технологические параметры разрабатываемой лесосеки, таксационная характеристика насаждения, вид рубки и ее интенсивность, протяженность трассы и расстояние между ними. При

этом нормы циклового времени работы и нормы выработки в смену такой техники с учетом обозначенных факторов отсутствуют. Отсутствуют также данные по лесоводственно-экологическим последствиям применения этих машин в горных условиях лесосек.

В этой связи, для более широкого применения таких машин потребовалось исследование процесса их работы с целью достоверного прогнозирования общих затрат на первичную транспортировку древесины и повреждаемости лесной среды в условиях горной местности.

В соответствии с поставленной целью были обозначены следующие задачи:

1. Провести структуризацию цикла работы машины Mounty 4000 в горной местности и собрать данные в условиях производства, необходимые для прогнозирования прямых затрат на первичную транспортировку древесины.

2. Провести имитационный эксперимент для получения регрессионной зависимости повреждаемости деревьев, оставляемых на лесосеке от расстояния подтаскивания хлыстов под линию несущего каната, интенсивности рубки и густоты насаждения.



Рисунок 1. Машина Mounty 4000 с процессорной головкой WoodyH60

Figure 1. Mounty 4000 machine with WoodyH60 processor head

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

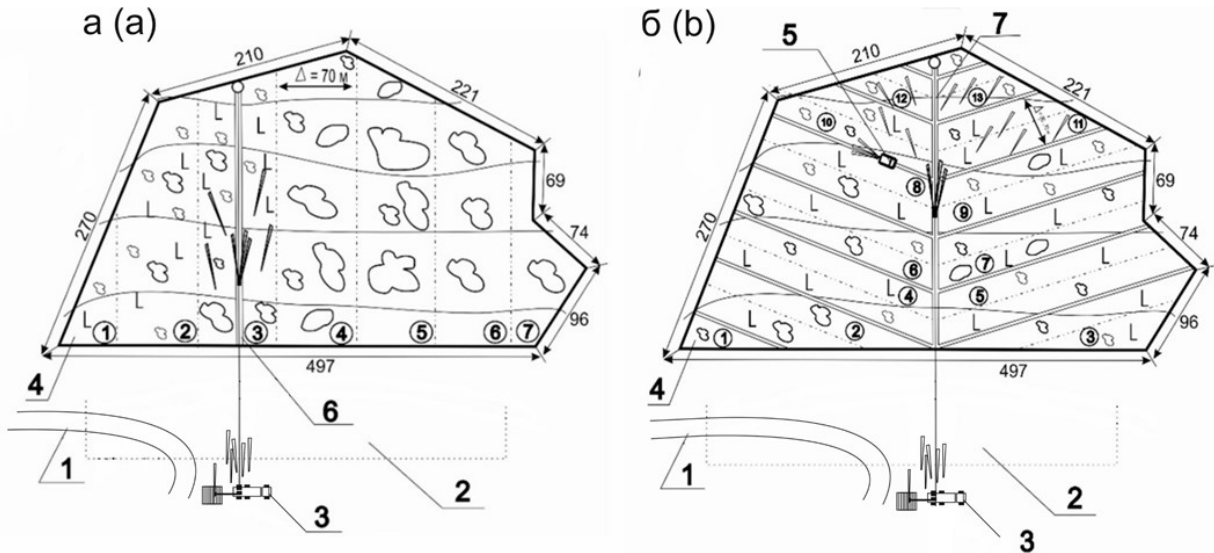


Рисунок 2. Технологические схемы разработки лесосек с прямым склоном в горной местности: а – отдельная работа горного процессора; б – совместная работа горного процессора в системе с трелевочным трактором

Figure 2. Technological schemes for the development of cutting areas with a straight slope in mountainous: а – work of the mining processor; б – operation of the mining processor and the skidding tractor

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Основные технические характеристики исследуемой машины Mounty 4000 с процессорной головкой Woody H60

Table 1

The main technical characteristics of the Mount 4000 machine under study with a Woody H60 processor head

Наименование   Name	Размерность   Dimension	Технические данные   Technical data
База машины   The base of the machine	-	MAN 33410
Колесная формула   Wheel formula	-	6x6
Колесная база   Wheelbase	м   m	3,2+1,38
Габаритные размеры (длина, ширина и высота)   Overall dimensions (length, width and height)	м   m	8,43x2, 55x3,71
Марка манипулятора   Brand of the manipulator	м   m	PENZ 20.80
Максимальный подъемный момент   Maximum lifting torque	кНм   kNm	200
Максимальный крутящий момент   Maximum torque	кНм   kNm	42
Вылет манипулятора   Departure of the manipulator	м   m	9,6
Общая масса   The total weight	т   t	25
Длина несущего троса   Length of the carrier cable	м   m	550
Диаметр несущего троса   Diameter of the carrier cable	м   m	0,02
Длина тягового каната   Length of the traction rope	м   m	650
Диаметр тягового каната   Diameter of the traction rope	м   m	0,012
Марка процессора   Processor brand	-	Woody H60
Диаметр обработки   Processing diameter	м   m	0,07...0,55
Мощность подачи   Feed capacity	кН   kN	24-30
Скорость подачи   Feed rate	м/с   m/s	0...5
Скорость резания   Cutting speed	м/с   m/s	40

**Материалы и методы**

**Объект и предмет исследований**

Объектом исследования является процесс первичной транспортировки древесины машиной Mounty 4000 отдельно и в системе с трелевочными тракторами.

Предметом исследования являются эколого-экономические показатели функционирования машины Mounty 4000 в горной местности.

Для прогнозирования прямых производственных затрат на первичную транспортировку древесины машиной Mounty 4000 + WoodyH60 предложено использовать следующее выражение:

$$C_1 = \frac{C_{msm} M_j k_{изр} \sum_{i=1}^I T_i}{3600 V_p m \varphi} = \frac{C_{msm} k_{изр} M_j \left( T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8 + T_9 + T_{10} + T_{11} \right)}{3600 V_p m \varphi}, \tag{1}$$

где  $C_{msm}$  – себестоимость машино-смены Mounty 4000, руб;

$M_j$  – объем вырубаемой древесины вырубимый в  $j$ -ый прием рубки на разрабатываемой лесосеке, м<sup>3</sup>;

$k_{изр}$  – доля вырубаемого компонента леса;

$m$  – продолжительность смены, ч;  
 $\varphi$  – коэффициент использования времени смены;

$V_p$  – объем трелеваемой пачки, м<sup>3</sup>;

$T_i$  – продолжительность  $i$ -ой составляющей времени цикла первичной транспортировки древесины, с;

$I$  – число составляющих времени цикла первичной транспортировки;

$T_1$  – продолжительность подъема крюка к каретке, с;

$T_2$  – продолжительность движения каретки от рабочей площадки к месту формирования пачки хлыстов (деревьев, сортиментов), с;

$T_3$  – продолжительность опускания крюка от каретки к чоковерщику, с;

$T_4$  – продолжительность подтягивания крюка с тросом к месту зацепки хлыстов (деревьев, хлыстов, сортиментов), с;

$T_5$  – продолжительность чоковерки хлыстов (деревьев, сортиментов), с;

$T_6$  – продолжительность подтрелевки хлыстов (деревьев, сортиментов) к канатной трассе, с;

$T_7$  – продолжительность подъема хлыстов (деревьев, сортиментов) к каретке, с;

$T_8$  – продолжительность перемещения хлыстов (деревьев, сортиментов) по канатной дороге, с;

$T_9$  – продолжительность ожидания сигнала оператора об окончании обработки предметов труда из предыдущей партии, с;

$T_{10}$  – продолжительность опускания хлыстов (деревьев, сортиментов) на погрузочную площадку, с;

$T_{11}$  – продолжительность отцепки хлыстов (деревьев, сортиментов) на погрузочной площадке, с.

Для прогнозирования повреждаемости деревьев  $C_2$  на первичной транспортировке древесины при использовании машины Mounty 4000 + WoodyH60 потребовалось установление следующей зависимости

$$C_2 = f(N, l_n, k_{изр}), \quad (2)$$

где  $N$  – густота насаждения, шт/га;

$l_n$  – расстояние подтрелевки, м;

$k_{изр}$  – доля вырубаемого компонента леса.

Реализация представленных выражений для комплексной оценки эффективности выполнения первичной транспортировки древесины потребовала проведения экспериментальных исследований.

### Сбор данных

Для прогнозирования затрат на трелевку древесины при использовании машины Mounty 4000+ WoodyH60 был проведен производственный эксперимент с целью получения информации по составляющим ее цикла работы. Наблюдения проводились в период с марта 2022 г. по май 2023 г. в Смолянском лесничестве, которое расположено в Смолянской области южно-центральной части Болгарии, где преобладают хвойные насаждения: ель, белая сосна и пихта. Лесная площадь лесничества составляет 17271,8 га. Общий запас составляет 4 467 805 м<sup>3</sup>. Ежегодный средний объем лесопользования составляет 355 17 м<sup>3</sup>. На рис. 3 видно, что основной резерв для лесозаготовок (333 860 м<sup>3</sup>) расположен на крутых склонах местности (20...30 градусов), где горные процессоры наиболее востребованы.

Рабочая бригада состояла из трех человек – один оператор, один чоковерщик, один рабочий с бензопилой для валки деревьев, обрезки их вершин и стволов от сучьев. Для оператора канатная дорога имела приоритет. По прибытии новой партии хлыстов он прерывал работу процессорной головки на верхнем складе и занимался разгрузкой. После того как разгрузка была завершена, каретка сразу же отправлялась обратно к месту формирования новой пачки лесоматериалов. Скорость движения каретки вверх в холостом состоянии была до 5 м/с, а вниз в загруженном состоянии составляла от 2 до 4 м/с в зависимости от массы груза.

Замеры продолжительности рабочих операций проводились хронометражным методом с точностью до 1 секунды. Длины и диаметры трелеваемых хлыстов измерялись рулеткой с точностью до 1 см. Было зафиксировано 1250 циклов транспортировки древесины с погрешностью измерения времени менее 3 %. Исследование проводилось при заготовке и транспортировке древесины с 33 трасс канатной установки при суточной производительности от 20,9 до 58,0 м<sup>3</sup>. Средняя рейсовая нагрузка при выполнении выборочных рубок составляла 0,9 м<sup>3</sup>. Среднее расстояние трелевки составило 181 м (рис. 4).

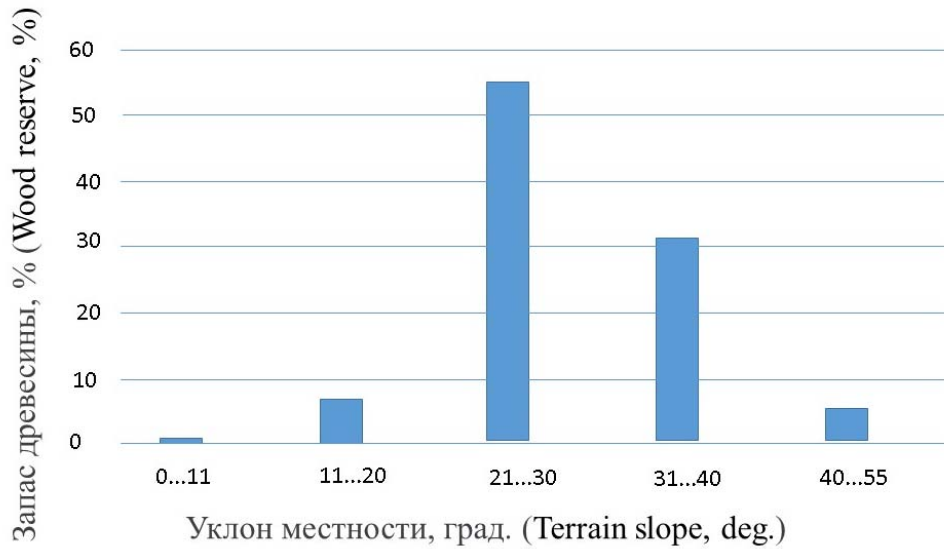


Рисунок 3. Распределение запаса леса в зависимости от уклона местности в Смолянском лесничестве Республики Болгария

Figure 3. Distribution of forest stock depending on the slope of the terrain in the Smolyansky forestry of the Republic of Bulgaria

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

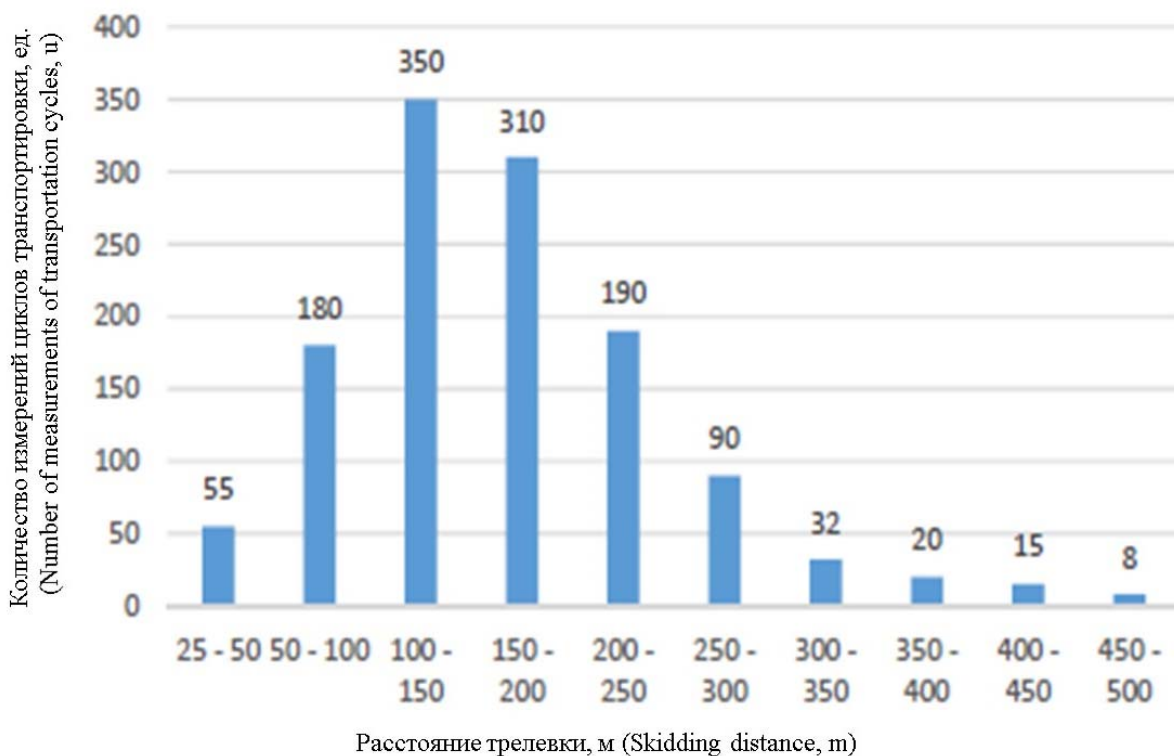


Рисунок 4. Количество измерений циклов транспортировки древесины при различных расстояниях трелевки  
Figure 4. Number of measurements of wood transportation cycles at different skidding distances

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition



Для прогнозирования повреждаемости деревьев  $C_2$  при использовании машины Mouny 4000 + WoodyH60 на первичной транспортировке древесины был проведен имитационный эксперимент (среда Solidworks), где на двух уровнях варьировались три основных фактора. Это расстояние подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната –  $l_n$ ; густота насаждения –  $N$  и доля вырубемого компонента леса –  $k_{изр}$ . Таким образом, было проведено 8 опытов с дублированием каждого из них 15 раз. (табл. 2).

### *Анализ данных*

Обработка результатов производственного и имитационного эксперимента осуществлялась в среде MS Excel.

Для получения статистических характеристик составляющих элементов времени цикла первичной транспортировки древесины, были проведены предварительно 100 замеров по продолжительности зацепки хлыстов –  $T_5$ , и далее на основе полученных данных определялось минимальное число измерений для репрезентативной выборки. Для этого рассчитывался коэффициент вариации, задавался показатель точности ошибки наблюдений между генеральной и выборочной средними. В нашем случае была задана вероятностью возникновения ошибки – 95% (уровень значимости  $p=0,05$ ). Минимально необходимое количество наблюдений для получения репрезентативной выборки составило – 43. После этого сбор статистической информации по всем составляющим цикла первичной транспортировки древесины осуществлялся следующим образом: упорядочивание значений ряда наблюдений по возрастанию; проверка результатов наблюдений на аномальность; расчет параметров статистических оценок; выбор закона распределения, выравнивание ряда по выбранному закону и

проверка согласия эмпирического и теоретического распределений по критерию Пирсона.

Для получения зависимости повреждаемости деревьев от густоты насаждения ( $N$ ), расстояния подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната ( $l_n$ ), интенсивности рубки ( $k_{изр}$ ) был проведен имитационный эксперимент в среде Solid works. Последовательность эксперимента была следующей. Сначала с помощью абриса создавалась конфигурация лесосеки. Затем в соответствии с таксационным описанием насаждения на ее поверхности размещались деревья со своими индивидуальными характеристиками. Далее в соответствии с программой рубки от пня отделялись стволы деревьев, предназначенные для валки и укладывались на землю с учетом положения оставляемых на лесосеке для последующего лесовыращивания. После этого строилась траектория подтрелевки хлыстов к трассе канатной установки; по полученной траектории определялось количество контактов между деревьями и хлыстами, которые вытягивались с полупасек к трассе канатной установки. В ходе обработки данных имитационного эксперимента подтвердилась гипотеза о нормальности распределения выходной величины  $C_2$  по критерию Пирсона –  $\chi^2$ ; а также гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов по критерию Кохрена –  $G$ . После этого были определены значимые коэффициенты регрессии с помощью критерия Стьюдента –  $t$  и получено с подтверждением достоверности по критерию Фишера –  $F$  следующее уравнение:

$$C_2 = -0,085153 - 0,000294 N + 0,1414816 l_n + 4,6392857 k_{изр} - 0,000331 N l_n + 0,0167399 N k_{изр} - 0,673806 l_n k_{изр} + 0,009938 N l_n k_{изр}. \quad (3)$$

Характеристики изменяемых факторов

Table 2

Characteristics of the measured factors

Фактор   Factor		Уровни фактора   Factor levels			Интервал варьирования   Interval variations	
Наименование   Name	Обозначение   Designation	верхний   top	основной   main	нижний   lower		
	натуральное   natural				нормализованное   normalized	
Густота насаждения, шт./га   Planting density, pcs./ha	$N$	$x_1$	1681	901	121	780
Расстояние подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната, м.   Distance of pulling timber under the line of the supporting rope, m	$l_n$	$x_2$	38	20	2	18
Интенсивность рубки   Felling intensity	$k_{цр}$	$x_3$	0,8	0,5	0,2	0,3

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

### Результаты

Результаты хронометражных наблюдений для сбора данных по составляющим времени цикла работы машины Mounty 4000 + WoodyH60 представлены в табл. 3-6.

По результатам проведенных наблюдений общее среднее рабочее время в течении дня составило – 9 часов и 25 минут (565 минут). Среднее количество циклов – 43 в день. Продолжительность среднего цикла – 7 минут 22 секунды  $\pm$  21 секунда, с вероятностью возникновения ошибки 95% ( $p=0,05$ ). Максимальная производительность - 58 м<sup>3</sup>/см.

Анализ структуры рабочего времени (табл. 3) показывает, что доля времени на выполнение непосредственно первичной транспортировки (5 часов 10,5 минуты) составляет 57,5 % от общей продолжительность работы.

Время подготовки и время завершения работ является регулярным и включает в себя: техническую подготовку инструмента и оборудования; натяжение поддерживающего каната; обследование канатной дороги; выход бригады к рабочему месту.

Заключительные работы включают в себя: ослабление поддерживающего троса и опускание каретки на землю; возвращение бригады с рабочего места к машине на погрузочный пункт; сбор инструментов, бензопил и личного инвентаря.

Среди перерывов наибольшая доля приходится на техническое обслуживание (смена режущих цепей, заточка цепей, проверка и заправка бензопил).

Нерабочее время на первичной транспортировке древесины включает в себя обеденный перерыв, отдых, перерывы по личным причинам. Кроме этого, оно может быть связано с необходимостью погрузки и сортировки лесоматериалов на верхнем складе, а также проверки контролирующих органов. В этом случае оператор прерывает процесс первичной транспортировки, перебирает сортаменты рядом с грузовым автомобилем, записывает их диаметр по торцу. После этого осуществляется погрузка древесины на лесовозный транспорт в присутствии представителя лесного хозяйства, который заполняет необходимые документы учета. В это время рабочие на вырубке не заняты.

Общая структура рабочего времени в течении дня

Table 3

General structure of working time during the day

Рабочие операции   Work operations	Продолжительность 43 циклов работы, мин   Duration 43 operating cycles, min	Продолжительность 43 циклов работы, %   Duration of 43 operating cycles, %
Чистое время работы в течении дня   Total net work time during the day		
Составляющие элементы циклового времени - $T_1$ , $T_3$ , $T_7$ , $T_9$ , $T_{10}$ и $T_{11}$   The constituent elements of cycle time are $T_1$ , $T_3$ , $T_7$ , $T_9$ , $T_{10}$ and $T_{11}$	40,3	7,13
Время на формирование трелюемой пачки- $T_4$ , $T_5$ и $T_6$   Time to form a treaded pack - $T_4$ , $T_5$ and $T_6$	174,9	30,97
Время на движение каретки по несущему канату в холостом и рабочем состоянии - $T_2$ и $T_8$   Time for the carriage to move along the supporting rope in idle and working condition - $T_2$ and $T_8$	95,3	16,87
Общее чистое время работы в течении дня   Total net work time during the day	310,5	54,97
Вспомогательное время   Auxiliary time		
Подготовительно-заключительные работы   Preparatory and final work	45	7,97
Организационные перерывы   Organizational breaks	5	0,89
Время на перемещения работников внутри лесосеки   Time to move workers inside the cutting area	8,5	1,5
Обслуживание техники (устранение неисправностей, техническое обслуживание и заправка горюче-смазочными материалами)   Equipment maintenance (troubleshooting, maintenance and refilling with fuels and lubricants)	11	1,95
Общее вспомогательное время   Total auxiliary time	69,5	12,3
Нерабочее время   Non-working hours		
Нарушения рабочего процесса первичной транспортировки из-за погрузки, сортировки и проверки контролирующих органов   Primary transportation workflow disruptions due to loading, sorting and regulatory inspections	20	3,54
Обеденный перерыв   Lunch break	30	5,31
Перерывы на отдых между циклами   Rest breaks between cycles	12	2,12
Перерывы по личным причинам   Breaks for personal reasons	8	1,42
Общее нерабочее время   Total non-working time	70	12,39
Время вне рабочего места   Time away from the workplace		
Доставка рабочих на лесосеку и обратно   Delivery of workers to the cutting site and back	115	20,34
Общее время вне рабочего места   Total time away from work	115	20,34

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 4

Результаты измерений составляющих цикла работы машины Mouny 4000+ WoodyH60

Table 4

Measurement results of components of the cycle of operation of the machine Mouny 4000+ Woody H60

Составляющие времени цикла   Components of cycle time	Среднее значение, с   Average value, sec	Стандартное от- клонение, с   Standard deviation, sec	Минимальное зна- чение, с   Minimum value, sec	Максимальное зна- чение, с   Maximum value, sec
$T_1$	5.0	-	4	6
$T_3$	11.9	6.6	5	41
$T_4$	65.4	14.8	3	121
$T_5$	134.1	43.8	18	220
$T_6$	49.0	9.4	0	79
$T_7$	12.7	4.7	8	35
$T_9$	7.1	6.5	2	30
$T_{10}$	6.5	3.8	2	20
$T_{11}$	8.6	4.3	5	65
$\Sigma$	303.4			

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 5

Результаты измерений составляющей цикла работы  $T_2$  в зависимости от среднего расстояния трелевки

Table 5

Measurement results of the component of the work cycle  $T_2$  depending on the average skidding distance

Расстояние/время Distance/time	600 м   600 m	500 м   500 m	400 м   500 m	300 м   300 m	200 м   200 m	100 м   100 m
Среднее значение, с   Average value, sec	201.3	149.6	94.5	62.9	50.1	31
Минимальное значение, с   Minimum value, sec	185	122	95	61	45	25
Максимальное значение, с   Maximum value, sec	232	192	120	92	57	48
Стандартное отклонение, с   Standard deviation, sec	10.4	16.1	6.5	17.9	14.3	8.0

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Результаты измерений составляющей цикла работы  $T_8$  в зависимости от среднего расстояния трелевки

Table 6

Measurement results of the component of the  $T_8$  operation cycle depending on the average skidding distance

Расстояние/время	600 м   600 m	500 м   500 m	400 м   500 m	300 м   300 m	200 м   200 m	100 м   100 m
Расстояние/время Distance/time	225.5	180.2	180.2	135.3	89.9	40.0
Среднее значение, с   Average value, sec	205	161	161	128	81	42
Минимальное значение, с   Minimum value, sec	264	206	206	166	113	63
Максимальное значение, с   Maximum value, sec	11.4	18.1	18.1	16.5	7.9	8.2

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Полученное в ходе обработки данных имитационного эксперимента (табл. 7) регрессионное уравнение позволяет изучить характер воздействия техники на оставляемый древостой в зависимости от расстояния подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната, интенсивности рубки, густоты насаждения, объема хлыста и запаса древесины (рис. 4). При этом, через густоту насаждения можно изучить влияние на повреждаемость деревьев – запаса древесины  $q_{за}$  и объема хлыста  $V_{хл}$ , а также через расстояние подтаскивания лесоматериалов под линию несущего каната можно изучить влияния на повреждаемость – ширины трассы канатной установки  $b_c$  и ширины пасаки  $\Delta$ , угла укладки дерева  $\beta$  относительно трассы канатной установки и длины лесоматериала  $l_{н.м.}$ .

Анализ графика показал (рис. 5, а) что повреждаемость стволов оставляемых деревьев на первичной транспортировке древесины растет при увеличении запаса леса и увеличении интенсивности рубки. Из графика (рис. 5, б) видно, что уменьшение объема хлыста и увеличение запаса древесины на

1 га приводит к повышению повреждаемости деревьев на лесосеке. Динамика роста повреждаемости деревьев тем больше, чем больше становится интенсивность рубки вместе с объемом хлыста (рис. 5, в) и вместе с густотой насаждения (рис. 5, г).

На рис. 6 показана значимость основных факторов влияния на исследуемые показатели эффективности первичной транспортировки (общие производственные затраты –  $C_1$ ; повреждаемость деревьев, оставляемых на лесосеке –  $C_2$ ). Анализ гистограммы общих затрат на процесс первичной транспортировки древесины в качестве наиболее значимых факторов показал: интенсивность рубки –  $\beta/\alpha= 0,67$ ; ширину пасаки –  $\beta/\alpha= 0,74$ ; запас леса –  $\beta/\alpha= 0,84$ ; глубину лесосеки –  $\beta/\alpha = 1,0$ ; а также длину трассы канатной установки –  $\beta/\alpha= 1,1$ . Анализ гистограммы повреждаемости стволовой части деревьев оставляемых на лесосеке выявил следующие наиболее значимые природно-производственные факторы: ширина трассы канатной установки –  $\beta/\alpha= 0,58$ ; интенсивность рубки –  $\beta/\alpha= 0,95$ ; запас леса –  $\beta/\alpha= 1,0$ ; ширина пасаки –  $\beta/\alpha= 1,52$ .

Условия, результаты и анализ эксперимента

Table 7

Conditions, results and analysis of the experiment

Значения факторов и результаты эксперимента   Factor values and experiment results	№ опыта   № Experience							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$l_n, м   l_n, m$	2	2	18	18	2	2	18	18
$k_{изр}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,8	0,8	0,8	0,8
$N, шт./га   N, pc./him$	121	1681	121	1681	121	1681	121	1681
$C_{21}$	0,2	7,51	5,2	103,6	2,1	44,7	15,2	487,9
$C_{22}$	1,2	10,6	7,9	107,9	4,9	48,1	22,7	494,7
$C_{23}$	0,8	9,4	7,6	107,5	4,7	46,9	21,3	493,1
$C_{24}$	0,7	9,3	6,5	106,5	3,5	45,4	18,8	490,5
$C_{25}$	1,6	11,3	9	111,3	6,1	50,1	24,8	496,9
$C_{26}$	1,5	11,1	8,2	110,2	5,7	49,5	24,3	496,3
$C_{27}$	1,3	10,9	8,1	110,2	5,1	48,9	23,9	495,4
$C_{28}$	1,9	11,9	9,6	114,1	6,9	52,1	25,9	499,5
$C_{29}$	1,8	11,7	9,3	112,1	6,6	51,9	25,8	497,3
$C_{210}$	1,7	11,4	9,1	111,8	6,5	50,2	25	497,1
$C_{211}$	2,1	12,2	10,5	115,4	7,6	52,3	27,6	500,7
$C_{212}$	1,9	12,1	10,2	114,8	7,3	52,2	26,3	500,1
$C_{213}$	2,3	13,7	10,7	116,1	7,8	53,8	28,7	501,2
$C_{214}$	2,8	15,4	12,6	123,5	10,4	56,5	36	505,1
$C_{215}$	2,6	14,9	11,8	116,2	8,7	54,4	30,8	503,4
$\bar{y}_j$	1,62666667	11,56066667	9,08666667	112,08	6,26	50,46666667	25,14	497,28
$\sigma^2$	0,504952381	4,225349524	3,788380952	23,95028571	4,272571429	11,0652381	23,79542857	21,52171429
$\sigma$	0,710600015	2,0555655	1,946376365	4,893902912	2,067019939	3,326445264	4,878055819	4,639150168
$\hat{y}_i$	1,6266667	11,560667	9,0866667	112,08	6,26	50,466667	25,14	497,28
$v$	0,436844271	0,177806831	0,214201361	0,043664373	0,330194878	0,065913711	0,194035633	0,00932905

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

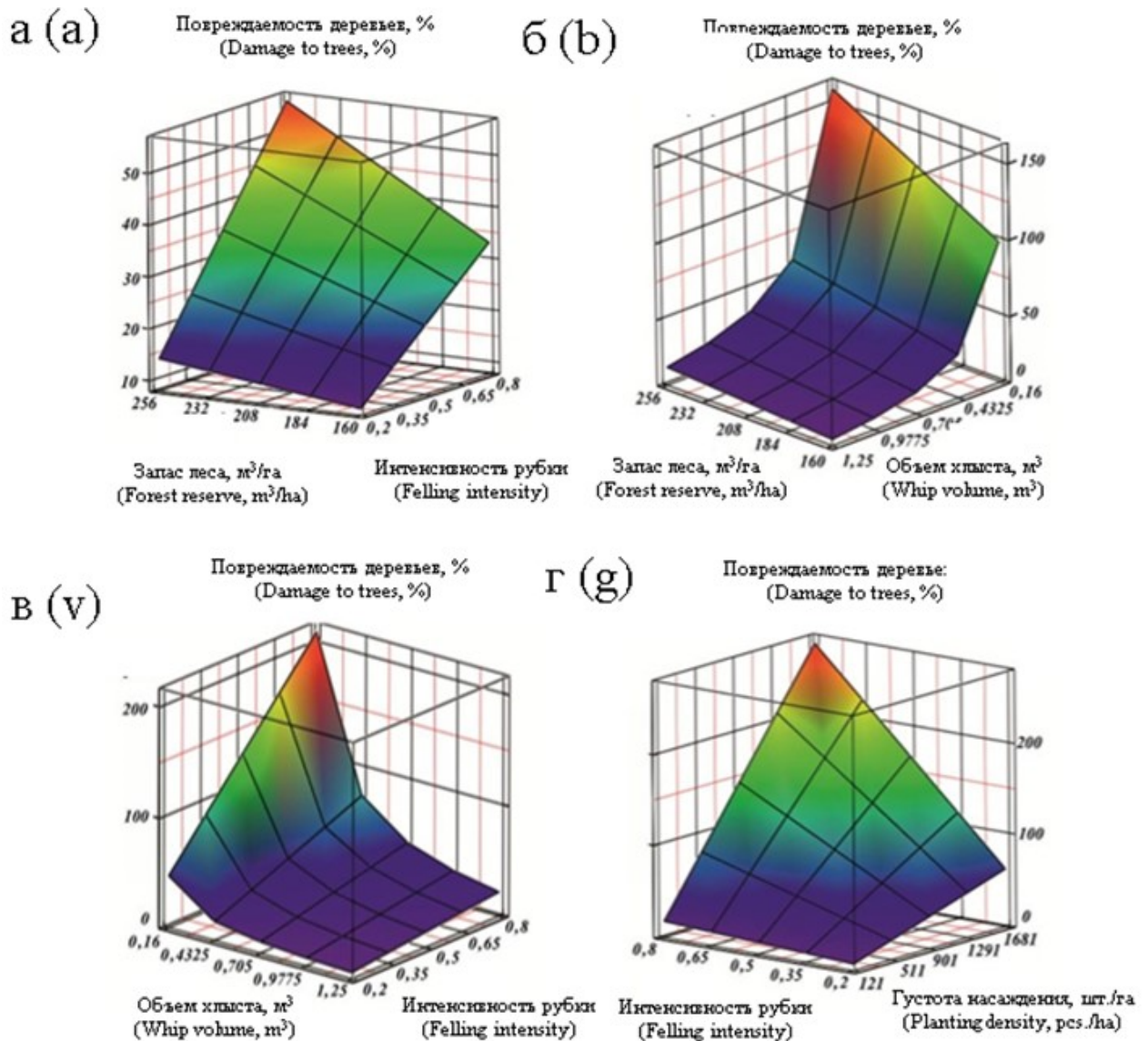


Рисунок 5. Графики зависимости повреждаемости оставляемых на лесосеке деревьев от объема хлыста, запаса древесины, расстояния подрековки и интенсивности рубки

Figure 5. Graphs of the dependence of the damage of trees left in the cutting area on the main factors of influence

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Анализ воздействия основных факторов влияния на показатели эффективности  $C_1$  и  $C_2$  позволили выявить наиболее подходящие для управления процессом первичной транспортировки древесины с целью его совершенствования. В результате были отобраны следующие лесоводственные и технологические параметры: ширина пазухи -  $\Delta$ ; интенсивность изреживания насаждения -  $k_{изр}$ ; угол укладки предмета труда относительно волокна -  $\beta$ . Они варьировались с помощью полученного математического

аппарата на пяти уровнях. Результаты моделирования показали рост повреждаемости деревьев при увеличении ширины пазухи, интенсивности рубки и уменьшении угла укладки дерева относительно трелевочного волокна. При этом были определены благоприятные области их значений при уровне повреждаемости  $C_2$  ниже требуемых нормативов - 12%. Они представлены в табличной форме на рис. 7.

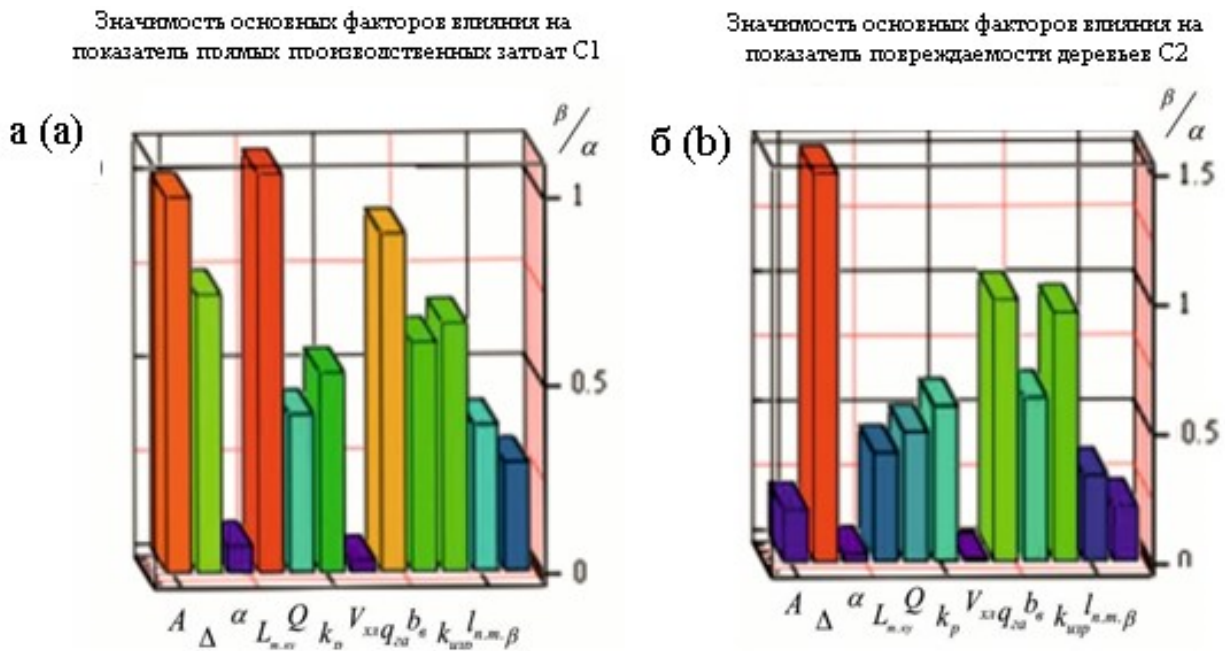


Рисунок 6. Определение значимости основных факторов влияния на показатели  $C_1$  и  $C_2$

Figure 6. Determining the significance of the main factors influencing indicators  $C_1$  and  $C_2$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

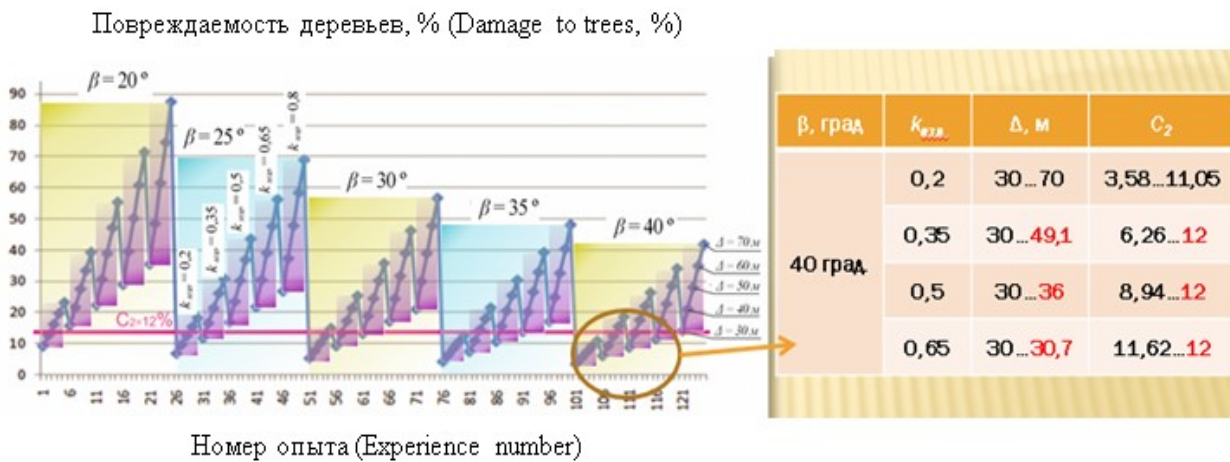


Рисунок 7. Результаты расчета повреждаемости деревьев при работе Mouny 4000+ Woody H60

Figure 7. Results of calculating the damage to trees during operation of the Mouny 4000+ Woody H60

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition



### Обсуждение

Вопросами исследования показателей выполнения первичной транспортировки древесины занимались многие российские и зарубежные ученые.

Анализ этих работ показывает, что эффективность выполнения рубок на горных склонах, во многом зависит от результата выполнения первичного транспорта леса. Данная операция является наиболее затратной на лесосеке и в наибольшей степени определяет экологический ущерб окружающей среде. При этом, в настоящее время, по мнению Каляшова В.А. и других ученых (2022) [10] выбор технологии первичной транспортировки древесины, техники для ее выполнения, схем и параметров работы происходит без достаточного обоснования.

По мнению Заикина А.Н. (2019, 2023) [8-9, 17] для принятия научно-обоснованных решений в этом вопросе требуется разработка комплексного критерия оценки эффективности, учитывающего экологические последствия и экономический результат выполнения операции. На его основе необходима разработка соответствующего математического аппарата и программного обеспечения. Для создания такого обобщенного критерия качества представляется целесообразным задействовать процедуры свертывания целей по методу Гермеймера.

Результаты проведенных исследований, представленные в статье, могут лечь в основу создания такого математического аппарата для достоверного прогноза эколого-экономических показателей первичной транспортировки древесины, а также дать возможность использовать комплексный критерий эффективности для многокритериальной оценки и возможно оптимизации процесса на примере функционирования машины Mounty 4000 в горных условиях лесосек. В дальнейших исследованиях необходимо создание моделей функционирования всех других перспективных альтернатив, включая канатные лесотранспортные системы на базе аэростатических конструкций. По мнению В.С.Сюнева и Графовой (2022, 2023) [6, 18] в оценке

экологического ущерба наряду с повреждаемостью деревьев, оставляемых на лесосеке необходимо также учитывать повреждаемость почвы и подроста.

### Заключение

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведена структуризация цикла работы машины Mounty 4000 и на ее основе получена математическое выражение для расчета затрат на эксплуатацию при выполнении первичной транспортировки древесины. По всем составляющим времени цикла получены законы распределения и статистические характеристики их продолжительностей в ходе производственного эксперимента в условиях горной местности Болгарии. Гипотеза нормальности распределения была подтверждена критерием Пирсона при заданном уровне значимости  $p=0.05$ . Полученные результаты можно использовать при нормировании труда и при прогнозировании технико-экономической эффективности применения горных процессоров на лесозаготовках.

2. Проведен имитационный эксперимент для получения регрессионной зависимости повреждаемости деревьев, оставляемых на лесосеке от расстояния подтаскивания хлыстов под линию несущего каната ( $l_n=2...18$  м), интенсивности рубки ( $k_{изр} = 0,2...0,8$ ) и густоты насаждения ( $N = 121...1681$  шт./га). Полученное регрессионное выражение позволяет достоверно прогнозировать экологические последствия первичной транспортировки древесины с учетом применяемой технологии в условиях горных лесосек.

3. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований рекомендованы к использованию на стадии проектирования лесозаготовительного производства для комплексной оценки функционирования технических средств одновременно с экономических и экологических позиций. С этой целью А.С. Черных и др. (2023) [16] была разработана программа для ЭВМ «Программа для обоснования технологии и системы машин для лесозаготовок» (свидетельство о государственной регистрации № 2023662656).

### Список литературы

1. Абузов А. В., Григорьев И. В., Абузов Я. А., Каляшов В. А., Григорьева О. И. Методика расчёта экономической эффективности использования аэростатических летательных аппаратов на лесотранспортных операциях. *Resources and Technology*. 2023; 20 (2): 55-70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54301934>.
2. Абузов А. В., Рябухин П. Б. Оценка эффективности эксплуатации лесотранспортных систем на базе аэростатно-канатных установок. *Системы. Методы. Технологии*. 2019; 4 (44): 107-111. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41483214>.
3. Абузов А. В., Рябухин П. Б. Аэростатические аппараты для лесозаготовок в труднодоступных районах Известия высших учебных заведений. *Лесной журнал*. 2022; 1(385): 110-127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47964187>.
4. Абузов А. В., Рябухин П. Б. Технологии промежуточных рубок на труднодоступных территориях Известия высших учебных заведений. *Лесной журнал*. 2021; 4(382): 117-130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46332902>.
5. Бухтояров Л. Д., Абрамов В. В., Просужих А. А., Рудов С. Е., Куницкая О. А., Григорьев И. В. Анализ конструкций и технологий работы форвардеров на лесозаготовках. *Resources and Technology*. 2020; 17 (3): 1-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44258123>.
6. Графова Е. О., Сюзёв В. С., Горбач В. В. Анализ факторов негативного воздействия лесозаготовительного производства на природную среду Северо-западного региона РФ. *Лесотехнический журнал*. 2023; 2 (50): 5-24. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525077>.
7. Григорьев И. В., Дмитриев А. С., Каляшов В. А., Должиков И. С., Кривошеев А. А., Швецов А. С., Григорьева О. И. Сравнительный анализ воздействия на почвогрунты лесных машин с различными двигателями на склонах. *Системы. Методы. Технологии*. 2024; 1 (61): 122-129. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61559935>.
8. Заикин А. Н., Сиваков В. В., Шевелева Е. В. Методы снижения повреждаемости стволов деревьев при выборочных и санитарных рубках леса Известия высших учебных заведений. *Лесной журнал*. 2019; 4:200-211. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38538966>.
9. Заикин А. Н., Сиваков В. В., Зеликов В. А., Стасюк В. В., Чуйков А. С., Зеликова Н. В. Программное обеспечение для управления лесохозяйственным и лесозаготовительным процессами: оценка применимости. *Лесотехнический журнал*. 2022; 1 (45): 96-109. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525086>.
10. Каляшов В. А., До Туан А., Хитров Е. Г., Григорьева О. И., Гурьев А. Ю., Новгородов Д. В. Современные системы машин и технологии заготовки древесины и лесовосстановления в условиях горных лесосек. *Resources and Technology*. 2022; 19(2): 1-47. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49330872>.
11. Рудов С. Е., Куницкая О. А., Григорьев И. В., Григорьева О. И., Каляшов В. А., Нгуен Т. Н. Современные системы машин для освоения лесосек на склонах. Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021; 1: 35-42. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44560047>.
12. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Моделирование взаимодействия лесных машин с почвогрунтом при работе на склонах. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2021; 6(384): 121-134. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47312342>.
13. Рябухин П. Б. Лесозаготовки и экология лесной среды. *Системы. Методы. Технологии*. 2019; 3(43): 96-99. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yirtjj>.
14. Рябухин П. Б. Экономико-математическое моделирование оценки эффективности деятельности предприятий лесопромышленного комплекса. *Системы. Методы. Технологии*. 2020; 4(48): 139-144. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=uplhaw>.
15. Рябухин П. Б., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Обоснование технологических процессов и систем машин для лесосечных работ. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2023; 2(392): 88-105. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50793225>.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662656. Программа для обоснования технологии и системы машин для лесозаготовок / А.С. Черных, А.И. Максименков, Л.Д. Бухтояров, Д.Н. Афоничев, В.В. Абрамов, Е.В. Поздняков, Полукаров Д.А. (РФ). – Правообладатель: ФГБОУ ВО Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова (RU). – № 2023661918, заявлено 09.06.2023; зарегистрировано 09.06.2023. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=hvxwsm>.
17. Сиваков В. В., Заикин А. Н., Новикова Т. П., Зеликов В. А., Стасюк В. В., Чуйков А. С. Цифровизация системы организации рабочих процессов лесозаготовительных машин: оценка эффективности на примере "ponssse", "komatsu" и "john deere". Лесотехнический журнал. 2023; 3 (51): 200-218. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56967063>.
18. Сюнев В. С., Графова Е. О. Новые технические решения по снижению негативного воздействия лесопромышленных производств на лесную среду. Resources and Technology. 2022; 19 (1): 48-71. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48334315>.
19. Троянов И. Н., Абрамов В. В., Бухтояров Л. Д., Афоничев Д. Н., Черных А. С., Максименков А. И. Исследование технологических вариантов выполнения обрабатываемых операций лесосечных работ бензопилами. Лесотехнический журнал. 2019; 3 (35): 114-130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ysitvg>.
20. Capocchi I., Neri F., Borghini T., Bernetti I. (2023). Use of virtual reality technology in chainsaw operations, education and training. Forestry: An International Journal of Forest Research. DOI: 10.1093/forestry/cpad007.
21. Cavalli R. Steep terrain forest operations – challenges, technology development, current implementation, and future opportunities. International Journal of Forest Engineering. 2019; 30(3): 175. DOI: 10.1080/14942119.2019.1603030.
22. Erber G. Timber extraction by cable yarding on flat and wet terrain: a survey of cable yarder manufacturer's experience. Silva Fennica. 2020;54(2):10211. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10211>.
23. Francisca B. Safety in steep slope logging operations. Journal of Agromedicine. 2019; 24(2): 138. DOI: <https://doi.org/10.1080/1059924X.2019.1581115>.
24. Glushkov S. P., Boyadzhiev D. I., Popikov P. I., Chetverikova I. V., Abramov V. V., Polukarov D. A. Study of the operation of the Mouny 4000 machine in logging in mountainous conditions in Bulgaria. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2021;875:012037. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012037.
25. Herajarv H. Science as a decision-support tool in forest policies. Silva Fennica. 2021; 55(2): 10566. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10566> 2021.
26. Rätty J., Hauglin M., Astrup R., Breidenbach J. (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.
27. 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.
28. Shegelman I. R. The analysis of the research areas in Russian timber industry using the knowledge base on the scientific publications of Russian researchers. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2020; 12: 175. DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP2/SP20201043.
29. 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>.

## References

1. Abuzov A., Grigoriev I.V., Abuzov Ya.A., Kalyashov V.A., Grigorieva O.I. Metodika raschota ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya aerostaticeskikh letatel'nykh apparatov na lesotransportnykh operatsiyakh. [Methodology for calculating the economic efficiency of using aerostatic aircraft in timber transport operations.] Resources and Technology. 2023; 20 (2): 55-70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54301934>
2. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Otsenka effektivnosti ekspluatatsii lesotransportnykh sistem na baze aerostatno-kanatnykh ustanovok. [Assessment of the efficiency of operation of forest transport systems based on balloon-rope installations]. Sistemy. Metody. Tekhnologii. = Systems. Methods. Technologies. 2019;4(44):107-111. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41483214>
3. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Aerostaticheskiye apparaty dlya lesozagotovok v trudnodostupnykh regionakh. [Aerostatic devices for logging in hard-to-reach areas]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. = Russian forestry journal. 2022; 1(385):110-127. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47964187>
4. Abuzov A.V., Ryabukhin P.B. Tekhnologii promezhutochnykh rubok na trudnodostupnykh territoriyakh. [Technologies for intermediate felling in hard-to-reach areas]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. = Russian forestry journal. 2021;4(382):117-130. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46332902>
5. Bukhtoyarov L.D., Abramov V.V., Prosuzhikh A.A., Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Grigoriev I.V. Analiz konstruktsiy i tekhnologiy raboty forvarderov na lesozagotovkakh. [Analysis of designs and operating technologies of forwarders in logging operations.] Resources and Technology. 2020; 17 (3): 1-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44258123>
6. Grafova E.O., Syunev V.S., Gorbach V.V. Analiz faktorov negativnogo vozdeystviya lesozagotovitel'nogo proizvodstva na prirodnyuyu sredu Severo-zapadnogo regiona RF. [Analysis of factors of the negative impact of logging production on the natural environment of the North-Western region of the Russian Federation.] Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2023; 2 (50): 5-24. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525077>
7. Grigoriev I.V., Dmitriev A.S., Kalyashov V.A., Dolzhikov I.S., Krivosheev A.A., Shvetsov A.S., Grigorieva O.I. Sravnitel'nyy analiz vozdeystviya na pochvogrunty lesnykh mashin s razlichnymi dvizhitelyami na sklonakh. [Comparative analysis of the impact of forestry machines with various propulsion systems on slopes on soils.] Sistemy. Metody. Tekhnologii. = Systems. Methods. Technologies. 2019;4(44):107-111. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61559935>
8. Zaikin A. N., Sivakov V. V., Sheveleva E. V. Metody snizheniya povrezhdayemosti stvolov derev'yev pri vyborochnykh i sanitarnykh rubkakh lesa. [Methods for reducing damage to tree trunks during selective and sanitary logging]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal. = Russian forestry journal. 2019; 4:200-211. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38538966>
9. Zaikin A.N., Sivakov V.V., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S., Zelikova N.V. Programmnoye obespecheniye dlya upravleniya lesokhozyaystvennym i lesozagotovitel'nym protsessami: otsenka primenimosti. [Forestry and harvesting management software: assessing applicability.] Lesotekhnicheskii zhurnal = Forestry Engineering Journal. 2022; 1 (45): 96-109. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54525086>
10. Kalyashov V.A., Do Tuan A., Khitrov E.G., Grigorieva O.I., Guryev A.Yu., Novgorodov D.V. Covremennyye sistemy mashin i tekhnologii zagotovki drevesiny i lesovosstanovleniya v usloviyakh gornykh lesesek. [Modern machine systems and technologies for wood harvesting and reforestation in mountain logging areas]. Resources and Technology. 2022;19(2):1-47. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49330872>
11. Rudov S.E., Kunitskaya O.A., Grigoriev I.V., Grigorieva O.I., Kalyashov V.A., Nguyen T.N. Covremennyye sistemy mashin dlya osvoyeniya lesesek na sklonakh. [Modern machine systems for the development of logging sites on slopes]. Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya. = Repair. Recovery. Modernization. 2021;1:35-42. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44560047>
12. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigoriev I.V., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I. Modelirovaniye vzaimodeystviya lesnykh mashin s pochvogruntom pri rabote na sklonakh. [Modeling the interaction of forestry machines with soil when

working on slopes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal.* = Russian forestry journal. 2021;6(384):121-134. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47312342>

13. Ryabukhin P.B. *Lesozagotovki i ekologiya lesnoy sredy. Sistemy. Metody. Tekhnologii.* [Logging and ecology of the forest environment]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* = Systems. Methods. Technologies. 2019;3(43):96-99. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yirtjj>

14. Ryabukhin P.B. *Ekonomiko-matematicheskoye modelirovaniye otsenki effektivnosti deyatel'nosti predpriyatiy lesopromyshlennogo kompleksa.* [Economic and mathematical modeling of assessing the efficiency of activities of forestry enterprises]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* = Systems. Methods. Technologies. 2020;4(48):139-144. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=uplhaw>

15. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Grigorieva O.I. *Obosnovaniye tekhnologicheskikh protsessov i sistem mashin dlya lesosechnykh rabot* [Justification of technological processes and machine systems for logging operations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal.* = Russian forestry journal. 2023;2(392):88-105. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50793225>

16. Chernykh A. S., Maksimenkov A.I., Bukhtoyarov L. D. [et al.]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RF* [Certificate of state registration of computer program RU]. *Programma obosnovaniya tekhnologiy i sistem mashin dlya lesozagotovok* [Program for substantiation of technology and systems of machines for logging]. No. 2023661918, 2023. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=hvxwsm>

17. Sivakov V.V., Zaikin A.N., Novikova T.P., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S. *Tsifrovizatsiya sistemy organizatsii rabochikh protsessov lesozagotovitel'nykh mashin: otsenka effektivnosti na primere "ponssse", "komatsu" i "john deere".* [Digitalization of the system for organizing work processes of forestry machines: efficiency assessment using the example of "ponssse", "komatsu" and "john deere".] *Lesotekhnicheskii zhurnal* = Forestry Engineering Journal. 2023; 3 (51): 200-218. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56967063>

18. Syuneyev V.S., Grafova E.O. *Novyye tekhnicheskkiye resheniya po snizheniyu negativnogo vozdeystviya lesopromyshlennykh proizvodstv na lesnuyu sredu.* [New technical solutions to reduce the negative impact of timber industry on the forest environment.] *Resources and Technology.* 2022; 19 (1): 48-71. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48334315>

19. Troyanov I.N., Abramov V.V., Bukhtoyarov L.D., Afonichev D.N., Chernykh A.S., Maksimenkov A.I. *Issledovaniye tekhnologicheskikh variantov vypolneniya obrabatyvayushchikh operatsiy lesosechnykh rabot benzopilami.* [Study of technological options for performing processing operations in logging operations using chainsaws.] *Lesotekhnicheskii zhurnal* = Forestry Engineering Journal. 2019; 3 (35): 114-130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ysitvg>

20. Capecchi I., Neri F., Borghini T., Bernetti I. (2023). Use of virtual reality technology in chainsaw operations, education and training. *Forestry: An International Journal of Forest Research.* DOI: 10.1093/forestry/cpad007.

21. Cavalli R. Steep terrain forest operations – challenges, technology development, current implementation, and future opportunities. *International Journal of Forest Engineering.* 2019; 30(3): 175. DOI: 10.1080/14942119.2019.1603030.

22. Erber G. Timber extraction by cable yarding on flat and wet terrain: a survey of cable yarder manufacturer's experience. *Silva Fennica.* 2020;54(2):10211. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10211>.

23. Francisca B. Safety in steep slope logging operations. *Journal of Agromedicine.* 2019; 24(2): 138. DOI: <https://doi.org/10.1080/1059924X.2019.1581115>.

24. Glushkov S. P., Boyadzhiev D. I., Popikov P. I., Chetverikova I. V., Abramov V. V., Polukarov D. A. Study of the operation of the Mounty 4000 machine in logging in mountainous conditions in Bulgaria. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2021;875:012037. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012037.

25. Herajarv H. Science as a decision-support tool in forest policies. *Silva Fennica.* 2021; 55(2): 10566. DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.10566> 2021.

26. Rätý J., Hauglin M., Astrup R., Breidenbach J. (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.

27. 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.

28. Shegelman I. R. The analysis of the research areas in Russian timber industry using the knowledge base on the scientific publications of Russian researchers. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2020; 12: 175. DOI: 10.5373/JARDCS/V12SP2/SP20201043.

29. 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>.

### Сведения об авторах

*Глушков Сотир Петров* – доктор технических наук, профессор, Институт лесоводства Болгарской академии наук, 132, ул. Кл. Охридски, София, 1756, Болгария, <http://orcid.org/0000-0002-9089-417X>, e-mail: [sotirgluschkov@abv.bg](mailto:sotirgluschkov@abv.bg).

*Бояджиев Димитр Иванов* – доктор технических наук, профессор, Институт лесоводства Болгарской академии наук, 132, ул. Кл. Охридски, София, 1756, Болгария, <http://orcid.org/0000-0001-5716-0169>, e-mail: [velbuzhd5@gmail.com](mailto:velbuzhd5@gmail.com).

*Черных Александр Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1601-420X>, e-mail: [as-umu@mail.ru](mailto:as-umu@mail.ru).

*Попиков Пётр Иванович* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru).

*Афоничев Дмитрий Николаевич* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», кафедра электротехники и автоматики, ул. Мичурина, 1, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9066-6428>, e-mail: [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru).

✉ *Абрамов Виталий Викторович* – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8779-076X>, e-mail: [vitali1980a@mail.ru](mailto:vitali1980a@mail.ru).

*Полукаров Денис Анатольевич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5914-4928>, e-mail: [aviatorut@mail.ru](mailto:aviatorut@mail.ru).

*Савченко Станислав Игоревич* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8740-4838>, e-mail: [savchenko.stas2020@yandex.ru](mailto:savchenko.stas2020@yandex.ru).

### Information about the authors

*Sotir Petrov Glushkov* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Forestry, Bulgarian Academy of Sciences, 132 Cl. Ohridski street, Sofia, 1756, Bulgaria, <http://orcid.org/0000-0002-9089-41X>, e-mail: [sotirgluschkov@abv.bg](mailto:sotirgluschkov@abv.bg).

*Dimitar Ivanov Boyadzhiev* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Forestry, Bulgarian Academy of Sciences, 132 Cl. Ohridski street, Sofia, 1756, Bulgaria, <http://orcid.org/0000-0001-5716-0169>, e-mail: [velbuzhd5@gmail.com](mailto:velbuzhd5@gmail.com).

*Alexander S. Chernykh* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forest Industry, Metrology, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1601-420X>, e-mail: [as-umu@mail.ru](mailto:as-umu@mail.ru).

*Petr I. Popikov* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru).

*Dmitry N. Afonichev* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter the Great, Department of Electrical Engineering and Automatics, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9066-6428>, e-mail: [dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru).

✉ *Vitaly V. Abramov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forest Industry, Metrology, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8779-076X>, e-mail: [vitali1980a@mail.ru](mailto:vitali1980a@mail.ru).

*Denis A. Polukarov* – Postgraduate Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forest Industry, Metrology, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5914-4928>, e-mail: [aviatortut@mail.ru](mailto:aviatortut@mail.ru).

*Stanislav I. Savchenko* – Postgraduate Student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Department of Forest Industry, Metrology, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8740-4838>, e-mail: [savchenko.stas2020@yandex.ru](mailto:savchenko.stas2020@yandex.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/10>

УДК 621.865.8



## Динамическое нагружение элементов гидравлической системы манипулятора лесотранспортной машины при выравнивании рамы опорно-поворотного устройства

Ольга Р. Дорняк<sup>1</sup>✉, [ordornyak@mail.ru](mailto:ordornyak@mail.ru)  <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>

Людмила В. Маркова<sup>2</sup>, [l\\_v\\_markova@mail.ru](mailto:l_v_markova@mail.ru)

Павел В. Танчук<sup>1</sup>, [pavlentpv@mail.ru](mailto:pavlentpv@mail.ru)

Сергей К. Попиков<sup>3</sup>, [sergpopikov@mail.ru](mailto:sergpopikov@mail.ru)  <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

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

<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, ул. П.Бровки, 15, г. Минск, 220072, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Институт комплексного проектирования автомобильных дорог, ул. Депутатская, 11, г. Воронеж, 394055, Российская Федерация

Гидроманипуляторы могут использоваться для решения поставленных технических задач на площадках, которые имеют уклон или устроены на структурно-неустойчивых грунтах. В этих условиях надежная и безопасная работы гидроманипуляторов может быть обеспечена применением аутригеров. Реализация процесса выравнивания опорно-поворотной платформы относительно горизонта может осуществляться при различных положениях других элементов манипулятора - стрелы, рукояти и телескопического удлинителя. При этом происходит изменение со временем нагрузок на все гидроцилиндры мобильной системы. Интенсивность динамического нагружения зависит от комплекса конструктивных и режимных параметров. Для изучения характеристик динамического нагружения системы гидроцилиндров мобильной транспортно-технологической машины предложена математическая модель. Математическая модель построена универсальным методом на основе уравнений Лагранжа II рода для механической системы с четырьмя степенями свободы. Исследование модели проведено для случая, когда со временем изменяется только угол между горизонтальной плоскостью и плоскостью поверхности опорно-поворотной платформы. Остальные элементы манипулятора не смещаются относительно платформы. Выдвижение аутригера обеспечивается работой шестеренного насоса, поэтому подача рабочей жидкости имеет циклический характер. Модель учитывает пульсации давления, которые вызывают высокочастотные колебания элементов гидроагрегатов со значительной амплитудой. Показано, что увеличение частоты вращения вала шестеренного насоса может приводить к отклонению давления в гидроцилиндре аутригера от значений, полученных в условиях равновесия при соответствующем положении элементов манипулятора, а также к возрастанию амплитуды пульсаций давления по мере выравнивания платформы.

**Ключевые слова:** гидравлический манипулятор, математическая модель, динамика, лесотранспортная машина, гидравлический цилиндр, давление, аутригер, шестеренный насос.

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

**Благодарности:** авторы выражают признательность доктору технических наук, профессору кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ Попикову Петру Ивановичу за конструктивные советы при выполнении исследований.

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




**Для цитирования:** Динамическое нагружение элементов гидравлической системы манипулятора лесотранспортной машины при выравнивании рамы опорно-поворотного устройства / О. Р. Дорняк, Л. В. Маркова, П. В. Танчук, С. К. Попиков // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 168–187. – Библиогр.: с. 183–187 (28 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/10>.

*Поступила* 08.04.2024. *Пересмотрена* 04.05.2024. *Принята* 05.05.2024. *Опубликована онлайн* 17.06.2024.


### Article

## Dynamic loading of the hydraulic system elements for the timber transport machine manipulator during alignment of the frame of the pivoting device

Olga R. Dorniyak <sup>1</sup>✉, [ordorniyak@mail.ru](mailto:ordorniyak@mail.ru),  <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>

Lyudmila V. Markova<sup>2</sup>, [l\\_v\\_markova@mail.ru](mailto:l_v_markova@mail.ru)

Pavel V. Tanchuk<sup>1</sup>, [pavlentpv@mail.ru](mailto:pavlentpv@mail.ru)

Sergei K. Popikov<sup>3</sup>, [popikovpetr@yandex.ru](mailto:popikovpetr@yandex.ru)  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

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

<sup>2</sup>*Heat and mass transfer institute of the national academy of sciences of Belarus, Brovki str., 15, Minsk, 220072, Belarus*

<sup>3</sup>*Institute for Integrated Design of Highways, Deputatskaya str., 11, Voronezh, 394055, Russian Federation*

### Abstract

Hydraulic manipulators can be used to solve technical tasks on flatlands that have a slope or are arranged on structurally unstable soils. In these conditions, reliable and safe operation of hydraulic manipulators can be ensured by the use of outriggers. The implementation of the alignment process of the pivot platform relative to the horizon can be carried out with different positions of other elements of the manipulator - boom, handle and telescopic extension. At the same time, the loads on the hydraulic cylinders of the mobile system change over time. The intensity of dynamic loading depends on a set of design and operating parameters. A mathematical model is proposed to study the characteristics of dynamic loading of the hydraulic cylinder system of a mobile transport and technological bus. The mathematical model is constructed by a universal method based on Lagrange equations of the 2nd kind for a mechanical system with four degrees of freedom. The model was studied for the case when all the elements of the hydraulic manipulator are loaded, but over time only the angle between the horizontal plane and the plane of the surface of the pivot plate changes. The other elements do not shift relative to the platform. The extension of the outrigger is provided by the operation of a gear pump, therefore, the supply of working fluid is cyclic. The model takes into account pressure pulsations, which cause high-frequency oscillations of the elements of hydraulic units with a significant amplitude. It is shown that an increase in the rotation frequency of the gear pump shaft leads to a decrease in the pressure in the outrigger hydraulic cylinder from the values obtained under equilibrium conditions with the corresponding position of the manipulator elements, as well as to an increase in the amplitude of pressure pulsations as the platform is leveled.

**Keywords:** *hydraulic manipulator, mathematical model, dynamics, timber transport machine, hydraulic cylinder, pressure, outrigger, gear pump.*

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

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to professor Popikov Peter Ivanovich for constructive advice in carrying out research.

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

**For citation:** Dornyak O. R., Markova L. V., Tanchuk P. V., Popikov S. K. (2024). Dynamic loading of the hydraulic system elements for the timber transport machine manipulator during alignment of the frame of the pivoting device. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. X (XX), pp. 168-187 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/10>.

*Received* 08.04.2024. *Revised* 04.05.2024. *Accepted* 05.05.2024. *Published online* 17.06.2024.

### Введение

Гидравлические манипуляторы находят широкое применение при выполнении многих технологических операций на предприятиях лесного комплекса, а также в других отраслях промышленности – строительной, нефтяной, газовой. В сложных условиях надежность и безопасность работы мобильной машины могут обеспечить аутригеры (выносные опоры) (рис. 1). Нагруженность гидроцилиндров аутригеров зависит от многих геометрических и режимных параметров, а также свойств используемой гидромеханической системы. В процессе эксплуатации мобильной машины давление в штоковой полости гидроцилиндра должно изменяться в определенном диапазоне [1-2], поэтому практически важной является задача определения усилий на штоке гидроцилиндра аутригера и гидроцилиндров других элементов мобильной системы.

В научно-технической литературе наибольшее внимание уделено проблемам кинематики и динамики различных звеньев мобильных устройств – стрелы, рукояти, а также перемещаемого груза. При этом теоретические и экспериментальные исследования работы манипуляторов проводятся при условии стабильного положения опорно-поворотной платформы [3-4]. Важно, что также проводятся исследования, которые в рамках анализа статики и динамики учитывается деформативность элементов манипулятора [5-8]. Однако, большинство авторов не рассматривают усилия в гидроприводах подвижных конструктивных элементов, в том числе, выносных опор, выполняя расчет опорных реакций мобильной машины [4-8]. В работе [9] изучена зависимость усилия на штоках гидроцилиндров телескопических секций от расстояния между опорами. Теоретические и экспериментальные результаты исследования динамики элементов конструкции лесопогрузчиков с изменяющимся центром вращения технологического оборудования при вращении

стрелы с грузом относительно поворотного основания, а также совместное вращение корпуса базовой машины и стрелы с грузом представлены в [10-11].



Рисунок 1. Манипулятор Атлант-С 90-08 (ЛВ-185-08)

(Майкопский машиностроительный завод).

Источник: <http://maykop-mmz.com/good/22>

Figure 1. Manipulator Atlant- C 90-08 (ЛВ-185-08) (Maikop Machine-building Plant).

Source: <http://maykop-mmz.com/good/22>

Вопросы продольной и поперечной устойчивости лесных машин на основе условий предельного равновесия рассмотрены в [12-13]. В [8] для оценки вероятности опрокидывания транспортных средств, оснащенных манипуляторами, используется энергетический метод. Для каждой грани потенциального опрокидывания рассчитывается величина энергии удара, которую может выдержать транспортное средство без опрокидывания. Проведенное исследование показывают важность учета инерционных нагрузок при решении задач устойчивости мобильных машин.

Исследования [5, 14-15] доказали, что характеристики объемного насоса оказывают определяющее воздействие на зависимость от времени кинематических и динамических параметров отдельных звеньев манипуляционных систем, что позволяет

эффективно регулировать их движение. Показано, что при частотном регулировании возможна колебательная нестабильность давления рабочей жидкости в напорной части гидросистемы, а также высокочастотные осциллирующие перемещения запорно-регулирующего элемента предохранительного клапана.

Авторы [15], указывая на негативное влияние колебательной нестабильности кинематических и гидравлических параметров, считают, что целесообразно проведение дальнейших исследований специфических особенностей работы гидроприводов манипуляционных систем мобильных транспортно-технологических машин при частотном регулировании объемных насосов, с целью минимизации явлений кинематической и гидравлической нестабильности.

Следует отметить, что имеются и другие технические решения, которые помимо аутригеров позволяют предотвратить потерю устойчивости и опрокидывание нагруженной мобильной машины, которая функционирует на слабых грунтах, обладающих низкой прочностью на сдвиг и сжатие.

В [16] показана эффективность использования грунтовых якорей, которые не только повышают устойчивость погрузчиков, но и осуществляют естественное заземление машины, необходимое при работе вблизи линий электропередач.

Авторами [17] предложена новая конструкция аутригеров мобильной транспортно-технологической машины. Основная выносная опора, опирающаяся на грунт, дополнена анкерным устройством. На основе численного анализа математической модели обосновано, что рабочий орган анкерного устройства необходимо вводить под углом 30...45 градусов к горизонтальной поверхности. Анкерное устройство увеличивает значение восстанавливающего момента на 10-40%.

В [18] разработана динамическая модель лесопогрузчика на базе гусеничного экскаватора в трехмерной постановке. Модель учитывает деформацию грунта под основанием четырех выносных опор, а также упругую деформацию самих аутригеров. Модель прогнозирует снижение устойчивости машины вследствие деформаций грунта и, наоборот, повышение устойчивости вследствие податливости

звеньев манипулятора. Нагруженность гидроприводов аутригеров и остальных звеньев не рассматривается. Также не рассматривается процесс выравнивания платформы – переход из наклонного положения в горизонтальное.

Авторы [19-20] сформулировали и исследовали математическую модель динамики гидроманипулятора с рукоятью сложной формы. Уравнения динамики записаны в обобщенных координатах. Учитывались 4 степени свободы, в том числе, поворот колонны. Рама манипулятора не меняет своего горизонтального положения, и работа аутригеров не рассматривалась.

В [21-22] предложен комплекс устройств, позволяющих автоматизировать трудоемкую операцию ликвидации крена платформы гидроманипулятора. Устройства автоматического выравнивания предусматривают установку системы шести датчиков, подающих сигналы в блок управления гидравлической системой машины. Четыре датчика реагируют на соприкосновение штоков гидравлических цилиндров аутригеров с опорной поверхностью. Еще два датчика подают сигналы в блок управления, если имеется отклонение опорно-поворотной платформы в продольной и поперечной плоскости относительно горизонтальной поверхности. В блоке управления на основе полученных сигналов формируются команды на изменение положением штоков гидроцилиндров аутригеров, а также гидроцилиндров стрелы и рукояти до тех пор, пока значения углов отклонения платформы в продольной и поперечной плоскости относительно горизонтальной плоскости не будут равны нулю. Важно, что команды из блока управления могут поступать одновременно на все элементы гидравлической системы мобильной транспортно-технологической машины, что обеспечивает эффективность данного технического решения и невозможно при корректировке положения платформы оператором вручную.

Выбор эффективных и безопасных режимов выравнивания платформы манипуляционной системы требует исследования динамических процессов в гидроприводах, используемых для аутригеров, а также для стрелы и рукояти с телескопической частью. В [23] проанализирована математическая модель статического нагружения гидроцилиндров.

Целью данной работы является изучение интенсивности динамического нагружения системы гидроцилиндров мобильной транспортно-технологической машины в процессе выравнивания рамы опорно-поворотного устройства при фиксированных положениях, стрелы, рукояти и телескопического удлинителя.

### Материалы и методы

Исследование динамики гидравлического манипулятора проводится универсальным методом аналитической механики в 2D постановке. Расчетная схема для изучаемой механической системы (рис. 2) аналогична схеме, используемой в [23] для определения статической нагруженности силового гидропривода звеньев манипулятора лесотранспортной машины. Механическая система включает базовый автомобиль, раму опорно-поворотного устройства, поворотную колонну, стрелу, рукоять, телескопический удлинитель рукояти, аутригеры и гидроцилиндры. Все элементы механической системы считаются недеформируемыми. Груз, захваченный грейфером может совершать поступательное движение. Поворот колонны вокруг своей оси не рассматривается. Силы тяжести, показанные на расчетной схеме, учитывают, как вес конструктивного элемента манипулятора, так и вес гидроцилиндра, который обеспечивает движение этого элемента.

Вследствие деформаций грунтового основания рама лесотранспортной машины занимает наклонное положение (для определенности выбран крен вправо), как показано на рис. 2. Оператор приводит в действие гидронасос, начинается изменения положения лесотранспортной машины за счет движения правого аутригера. В общем случае принято, что в процессе перемещения платформы в горизонтальное положение, возможны независимые движения стрелы, рукояти, а также телескопическое

удлинение рукояти. Таким образом, выделенная механическая система имеет 4 степени свободы.

Уравнения движения рассматриваются относительно неподвижной системы отсчета OXYZ (рис. 2). Ось OX проходит через центры слайдеров после проседания грунта (точки O и A), OY совмещается с осью гидроцилиндра левого аутригера в начальном положении. На рис. 2 показаны также вспомогательные системы координат, оси которых параллельны неподвижным осям, а их начало совпадает с центром соответствующего шарнира. Система осей  $O_1X_1Y_1Z_1$  используется для описания положения точек стрелы,  $EX_2Y_2Z_2$  – для точек рукояти, телескопического удлинителя и груза.

На рис. 2 использованы следующие обозначения:

- $\alpha$  - угол поворота левого аутригера;
- $\tilde{\alpha}$  – угол между осью OX и горизонтом, характеризующий степень деформации грунта под правым аутригером;
- $\alpha_1$  – угол между плоскостью рамы опорно-поворотного устройства и горизонтальной плоскостью;
- $\alpha_3$  – угол между осью OX и линией  $O_2O_3$ ;
- $\varphi$  - угол между осью  $O_1X_1$  и осью стрелы  $O_1E$ ;
- $\varphi_1$  – угол между текущим положением плоскости рамы опорно-поворотного устройства и осью стрелы  $O_1E$ ;  $\varphi_1 = \varphi - \alpha_3$
- $\theta$  - угол между осью  $EX_2$  и осью рукояти  $EM_2$ ;
- $\theta_1$  – угол осью рукояти  $EM_2$  и осью стрелы  $O_1E$ ;
- $s$  – величина телескопического удлинения  $M_2M_3$

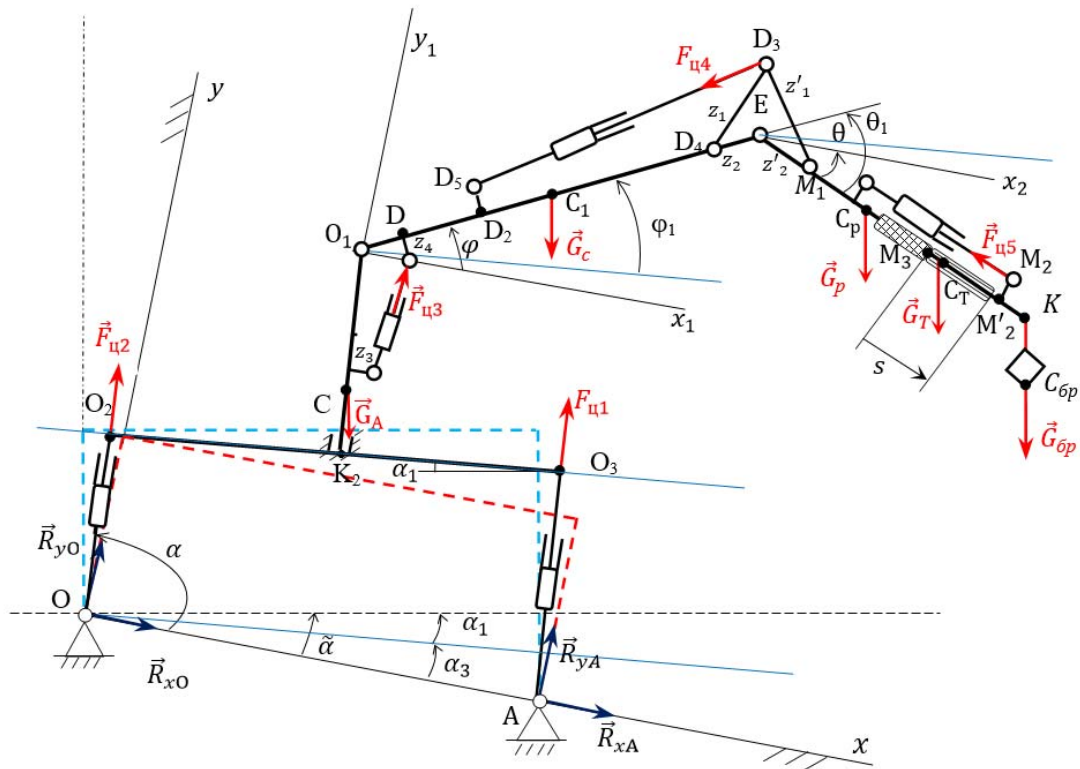


Рисунок 2. Расчетная схема. Конфигурация опорно-поворотного устройства в начальном положении - - - - - , в конечном положении - - - - - , в текущем положении - - - - - .  
Линии вида - - - - - обозначают горизонтальное, а вида - - - - - вертикальное направление.  
Прямые вида - - - - - параллельны раме опорно-поворотного устройства.

Источник: Собственная композиция авторов [23].

Figure 2. Calculation scheme. Configuration of the pivot frame in a critical position - - - - - , in the working position - - - - - , in an arbitrary position - - - - - .  
The lines of the view - - - - - indicate the horizontal, and the view - - - - - the vertical direction.  
The straight lines of the view - - - - - are parallel to the pivot frame

Source: Own Composition [23]

К механической системе приложены внешние активные силы и силы реакций связей. Активные силы представлены силами тяжести автомобиля  $\vec{G}_A$ , стрелы  $\vec{G}_1$ , рукояти  $\vec{G}_p$ , телескопической части  $\vec{G}_T$ , ротатора, грейфера и транспортируемого груза  $\vec{G}_{6p}$ , а также силами давления со стороны штоков гидроцилиндров аутригеров  $\vec{F}_{ц1}$  и  $\vec{F}_{ц2}$ , стрелы  $\vec{F}_{ц3}$ , рукояти  $\vec{F}_{ц4}$  и телескопического удлинителя  $F_{ц5}$ .

Точки приложения сил тяжести обозначены на рис. 2 как точки  $C_A, C_1, C_p, C_T$  и  $C_{6p}$ . Считается, что силы давления, а также реакции опор  $\vec{R}_{Ox}, \vec{R}_{Oy}$ ,

$\vec{R}_{Ax}, \vec{R}_{Ay}$  приложены к центрам соответствующих шарниров.

Уравнения движения механической системы записаны в форме уравнений Лагранжа II рода [24]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} &= Q_\alpha; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= Q_\varphi; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} &= Q_\theta; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{s}} \right) - \frac{\partial T}{\partial s} &= Q_s. \end{aligned}$$

Здесь  $T$  – кинетическая энергия манипуляционной системы,  $Q_i$  ( $i=\alpha, \varphi, \theta, s$ ) – обобщенные силы,

соответствующие обобщенным координатам:  $\alpha$  (угол поворота рамы опорно-поворотного устройства),  $\varphi$  (угол поворота стрелы),  $\theta$  (угол поворота рукоятки),  $s$  (удлинение телескопической части). Выражения обобщенных сил через обобщенные координаты использованы в [23] для решения задачи о

статическом нагружении элементов гидравлической системы манипулятора.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка для описания динамики манипуляционной системы с аутригерами при совместном движении всех звеньев имеет вид:

$$A_1 \ddot{\alpha} + A_{21} \ddot{\varphi} Z_2(\alpha, \varphi) + A_{31} \ddot{\theta} Z_3(\alpha, \theta) + A_{21} \dot{\varphi}^2 W_2(\alpha, \varphi) + A_{31} \dot{\theta}^2 W_3(\alpha, \theta) + A_{41} \dot{\theta} \dot{s} Z_3(\alpha, \theta) = Q_\alpha; \quad (1)$$

$$Q_\alpha = -\cos \alpha_1 (x_C G_A + x_{C_1} G_C + x_{C_P} G_P + x_{C_T} G_T + x_{6P} G_{6P}) -$$

$$-\sin \alpha_1 (y_C G_A + y_{C_1} G_C + y_{C_P} G_P + y_{C_T} G_T + y_{6P} G_{6P}) + F_{ц1} L \sin \alpha + F_{ц3} [x_D \sin \omega - y_D \cos \omega] +$$

$$F_{ц4} [x_{D_3} \sin \beta_5 - y_{D_3} \cos \beta_5] + F_{ц5} [x_{M_2} \sin \omega - y_{M_2} \cos \omega];$$

$$A_2 \ddot{\varphi} + A_{21} (\ddot{\alpha} Z_2(\alpha, \varphi) + \dot{\alpha}^2 Z_4(\alpha, \varphi)) + A_{33} [\ddot{\theta} \cos(\varphi - \theta) - \dot{\theta}^2 \sin(\varphi - \theta)] + A_{42} \dot{\theta} \dot{s} \cos(\varphi - \theta) = Q_\varphi; \quad (2)$$

$$Q_\varphi = -\cos \alpha_1 (x_{1C_1} G_C + x_{1C_P} G_P + x_{1C_T} G_T + x_{16P} G_{6P}) - \sin \alpha_1 (y_{1C_1} G_C + y_{1C_P} G_P + y_{1C_T} G_T + y_{16P} G_{6P}) +$$

$$F_{ц3} [x_{1D} \sin \omega - y_{1D} \cos \omega] + F_{ц4} [x_{1D_3} \sin \beta_5 - y_{1D_3} \cos \beta_5] + F_{ц5} [x_{1M_2} \sin(\pi + \theta) - y_{1M_2} \cos(\pi + \theta)];$$

$$A_3 \ddot{\theta} + A_{31} (\ddot{\alpha} Z_3(\alpha, \theta) + \dot{\alpha}^2 Z_5(\alpha, \theta)) + A_{33} [\ddot{\varphi} \cos(\theta - \varphi) + \dot{\varphi}^2 \sin(\theta - \varphi)] + 2A_{43} \dot{\theta} \dot{s} +$$

$$+ A_{42} \dot{\varphi} \dot{s} \cos(\varphi - \theta) + A_{41} \dot{\alpha} \dot{s} Z_3(\alpha, \theta) = Q_\theta; \quad (3)$$

$$Q_\theta = -\cos \alpha_1 (x_{2C_P} G_P + x_{2C_T} G_T + x_{26P} G_{6P}) - \sin \alpha_1 (y_{2C_P} G_P + y_{2C_T} G_T + y_{26P} G_{6P}) + F_{ц4} [x_{2D_3} \sin \beta_5 -$$

$$y_{2D_3} \cos \beta_5] + F_{ц5} [x_{2M_2} \sin(\pi + \theta) - y_{2M_2} \cos(\pi + \theta)];$$

$$- [A_{43} \dot{\theta}^2 \dot{s} + A_{41} \dot{\theta} \dot{\alpha} Z_3(\alpha, \theta) + A_{42} \dot{\varphi} \dot{\theta} \cos(\varphi - \theta)] = Q_s. \quad (4)$$

$$Q_s = -(G_T + G_{6P}) \sin(\theta - \alpha_1) - F_{ц5}.$$

Функции и константы уравнений (1-4) приведены в прил. 1-2, а значения констант – в прил. 3.

### Метод исследования и результаты

Система динамических уравнений (1-4) может быть использована для решения прямой и обратной задач динамики. Прямая задача состоит в определении неизвестных внешних сил  $F_{ц1}, F_{ц3}, F_{ц4}, F_{ц5}$ , приложенных к штокам гидроцилиндров по заданным зависимостям от времени всех обобщенных координат. Решение обратной задачи, наоборот, позволяет найти зависимости  $\alpha(t), \varphi(t), \theta(t), s(t)$  по заданным силам давлениям в гидроцилиндрах.

В данной работе рассмотрен частный случай нагружения гидроцилиндров манипулятора при выравнивании опорно-поворотной платформы, когда по известному закону изменяется угол ее наклона,

$\alpha = \alpha(t)$ . При этом полагается, что выравнивание платформы происходит при фиксированных относительно платформы положениях стрелы, рукоятки, телескопического удлинителя и груза:  $\varphi_1 = \text{const}$ ,  $\theta_1 = \text{const}$ ,  $s = \text{const}$ . При этом угловые скорости и угловые ускорения стрелы и рукоятки равны  $\dot{\theta} = \dot{\varphi} = \dot{\alpha}$ ;  $\ddot{\theta} = \ddot{\varphi} = \ddot{\alpha}$ . Кроме того,  $\dot{s} = 0$ ,  $\ddot{s} = 0$ .

Принято, что движение опорно-поворотной платформы обеспечивается работой шестеренного насоса. Известно, что подача насосов такого типа неравномерна, она имеет циклический характер [25]. При составлении динамических моделей гидропривода следует учитывать это явление, т.к. при определенных условиях пульсации давления шестеренного насоса могут вызывать высокоамплитудные колебания элементов гидроагрегатов [26].

В [27] обоснована математическая модель гидромеханической системы современной мобильной машины, которая позволяет определять перемещения выходного звена исполнительного гидродвигателя. Численный анализ математической модели [27] позволяет прогнозировать напорно-расходные характеристики системы в переходных режимах, в том числе при знакопеременной нагрузке, а также выявить влияние на работу рассматриваемой гидромеханической системы различных конструктивных и функциональных параметров, свойств рабочей жидкости.

В данной работе рассмотрен предельный вариант математической модели гидромеханической системы мобильной машины [27]. Скорость штока гидроцилиндра аутригера определяется, в частности, без учета утечки рабочей жидкости и податливости элементов гидропривода:

$$Q = \frac{\pi d_{ц1}^2}{4} v_{O_3},$$

где  $Q$  – скорость штока аутригера, м/с;  $d_{ц1}$  – диаметр поршня гидроцилиндра аутригера, м;  $v_{O_3}$  – производительность насоса м<sup>3</sup>/с.

Учитывая, что  $v_{O_3} = \dot{\alpha} \sqrt{|O_2|^2 + |O_3|^2}$ , получаем зависимость угловой скорости опорно-поворотной платформы от объемного расхода насоса в виде

$$\dot{\alpha} = \frac{Q(t)}{\frac{\pi d_{ц1}^2}{4} \sqrt{|O_2|^2 + |O_3|^2}}$$

Цикл подачи жидкости шестеренным насосом повторяется при повороте шестерни на угол, соответствующий одному шагу. За один оборот вала насоса число колебаний соответствует числу зубьев ведущей шестерни. Зависимость текущего расхода от времени зависит от ряда режимных и конструктивных факторов. При этом, согласно [25], коэффициент неравномерности потока

$$\delta = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{cp}} = \frac{\Delta Q}{Q_{cp}}; Q_{cp} = \frac{Q_{max} + Q_{min}}{2}.$$

Для шестеренного насоса с числом зубьев  $z$  коэффициент неравномерности равен  $\delta = 2/(z + 1)$  [25]. В расчетах число зубьев  $z=8$ , следовательно, коэффициент неравномерности  $\delta=0.22$ .

Амплитуда пульсаций расхода рабочей жидкости относительно среднего значения составляет  $\Delta Q = \delta \cdot Q_{cp}$ . В качестве среднего значения выбрано значение действительного расхода при данной частоте вращения вала, которое определяется по техническим характеристикам насоса:

$$Q_{cp} = \eta_n q_n n_n,$$

где  $\eta_n$  – объемный к.п.д. насоса;  $q_n$  – рабочий объем насоса, см<sup>3</sup>/об;  $n_n$  – частота вращения ведущей шестерни, об/мин.

Период пульсаций расхода определяется частотой вращения ведущей шестерни и числом зубьев. Круговая частота этих пульсаций  $\omega_n = 2\pi n_n z / 60$ . В расчетах полагаем, что  $Q_n(t) = Q_1 + Q_2 |\sin(\omega_n t)|$ ;  $Q_1 = Q_{min}$ ;  $Q_2 = \Delta Q$ . Характеристики насосов, используемые в расчетах, выбраны, следуя [28] (табл. 1). Значение  $\eta_n=0.95$ .

Таблица 1

Технические данные шестеренных насосов НШ

Table 2

Technical data of gear pumps NSh

Наименование параметра   Name of the parameter	НШ-34   NSh-34	НШ-71   NSh-71	НШ-100   NSh-100
Номинальный рабочий объем, см <sup>3</sup> /об   Nominal working volume, cm <sup>3</sup> /rev	34.05	71.01	99.98
Частота вращения, об/мин   Rotation speed, rpm	Номинальная   Nominal	1500	
	Минимальная   Minimum	350	
	Максимальная   Maximum	3000	1800
Номинальный расход, л/мин   Nominal flow rate, l/min	47.5	99.9	139.5
Максимальный расход, л/мин   Maximum flow rate, l/min	100.6	153.9	177.3
Давление на выпуске максимальное, МПа   Maximum outlet pressure, MPa	31	25	20

Источник: Шестеренный насос – высокопроизводительный. URL: [https://ah-rf.ru/images/companies/5/blog/argohytos%20russian/nasosu/%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%8B%20GP1\\_RU.pdf?1500562700958](https://ah-rf.ru/images/companies/5/blog/argohytos%20russian/nasosu/%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%8B%20GP1_RU.pdf?1500562700958).

Source: The gear pump is high-performance. URL: [https://ah-rf.ru/images/companies/5/blog/argohytos%20russian/nasosu/%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%8B%20GP1\\_RU.pdf?1500562700958](https://ah-rf.ru/images/companies/5/blog/argohytos%20russian/nasosu/%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%8B%20GP1_RU.pdf?1500562700958).

Рис. 3 иллюстрирует модельные зависимости подачи для шестеренного насоса НШ-71 для различных частот вращения вала. Кривые на рис. 3, а показывают, что среднее значение объемного расхода, а, следовательно, и амплитуда пульсаций, им определяемая, возрастают с увеличением частоты вращения вала насоса. Рис. 3, б показывает вклад в интенсивность пульсаций расхода другого параметра насоса - рабочего объема. Чем больше значение  $q_n$ ,

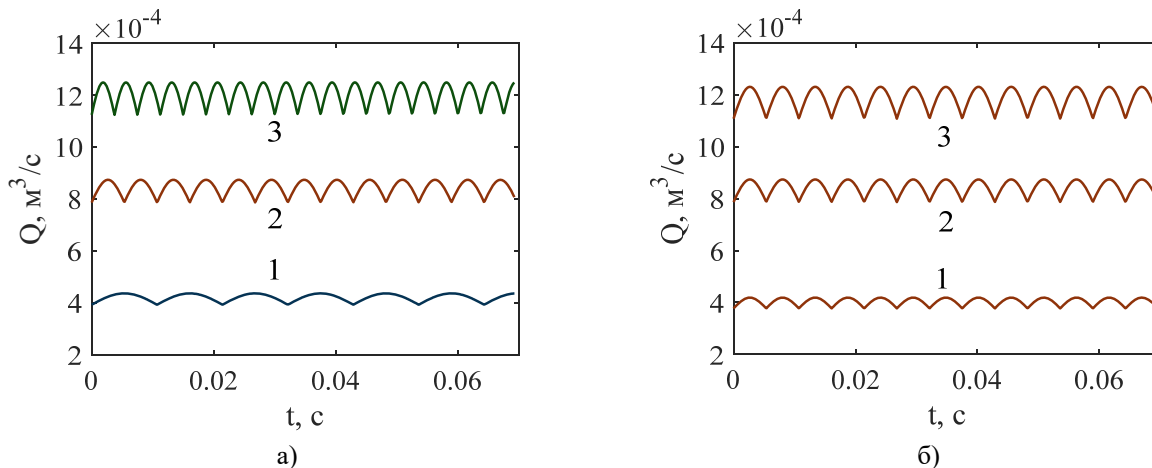


Рисунок 3. Зависимость изменения со временем подачи рабочей жидкости в гидроцилиндр аутригера  $Q, \text{ м}^3/\text{с}$   
 а) для шестеренного насоса НШ-71 при  $n_n=350 \text{ об/мин}$  - 1, 700 – 2, 1000– 3;  
 б) для шестеренных насосов НШ-34 - 1, НШ-71 – 2, НШ-100– 3 при  $n_n=700 \text{ об/мин}$ .

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 3. Dependence of the change over time of the working fluid supply to the hydraulic cylinder of the outrigger  $Q, \text{ m}^3/\text{s}$

- a) for the gear pump NSh-71 at  $n_n=350 \text{ rpm}$  - 1, 700 – 2, 1000– 3;
- b) for gear pumps NSh-34 - 1, NSh-71 – 2, NSh-100– 3 at  $n_n = 700 \text{ rpm}$ .

Source: own calculations

Расчет значений давлений на штоках гидроцилиндров проведен применительно к возможному аналогу гидроманипулятора АТЛАНТ-С 90 (ЛВ 185-14), выпускаемому Майкопским машиностроительным заводом. Все вычисления проведены с помощью, программы для ЭВМ, разработанной на языке MATLAB. Геометрические и массовые характеристики модельного манипулятора представлены в прил. 3.

Давление жидкости в гидроцилиндрах вычисляется по формуле  $p_{ци} = F_{ци}/(\pi d_{ци}^2)$ ,  $i=1,3,4,5$ . Значения диаметров внутренних цилиндров приняты следующими:  $d_{ц1}=80 \text{ мм}$ ,  $d_{ц3}=140 \text{ мм}$ ,  $d_{ц5}=140 \text{ мм}$ ,

тем выше средний расход, а значит больше амплитуда пульсаций подачи рабочей жидкости при одинаковой частоте. Поскольку период колебаний расхода для выбранных устройств порядка  $10^{-2} \text{ с}$ , то далее на рис. 4 и 5 для расчетных зависимостей давления в гидроцилиндрах, рассмотренных в более крупном временном масштабе порядка 10 с, на пульсирующий характер переменных указывают графики в виде ленты. Толщина ленты соответствует полной амплитуде колебаний.

$d_{ц3}=63 \text{ мм}$ . Отрицательные значения давления указывают на противоположное направление соответствующего усилия на штоке по отношению к тому, которое показано на рис. 2.

Начальный угол отклонения опорно-поворотной платформы от горизонтали составлял  $\alpha_1=15^\circ$ . Угол поворота стрелы относительно платформы  $\varphi_1$  варьировался в диапазоне от  $-23^\circ$  до  $+80^\circ$  градусов. Угол поворота рукояти относительно оси стрелы  $\theta_1$  изменялся от  $0^\circ$  до  $-90^\circ$  (положительное изменение углов выбрано против часовой стрелки).



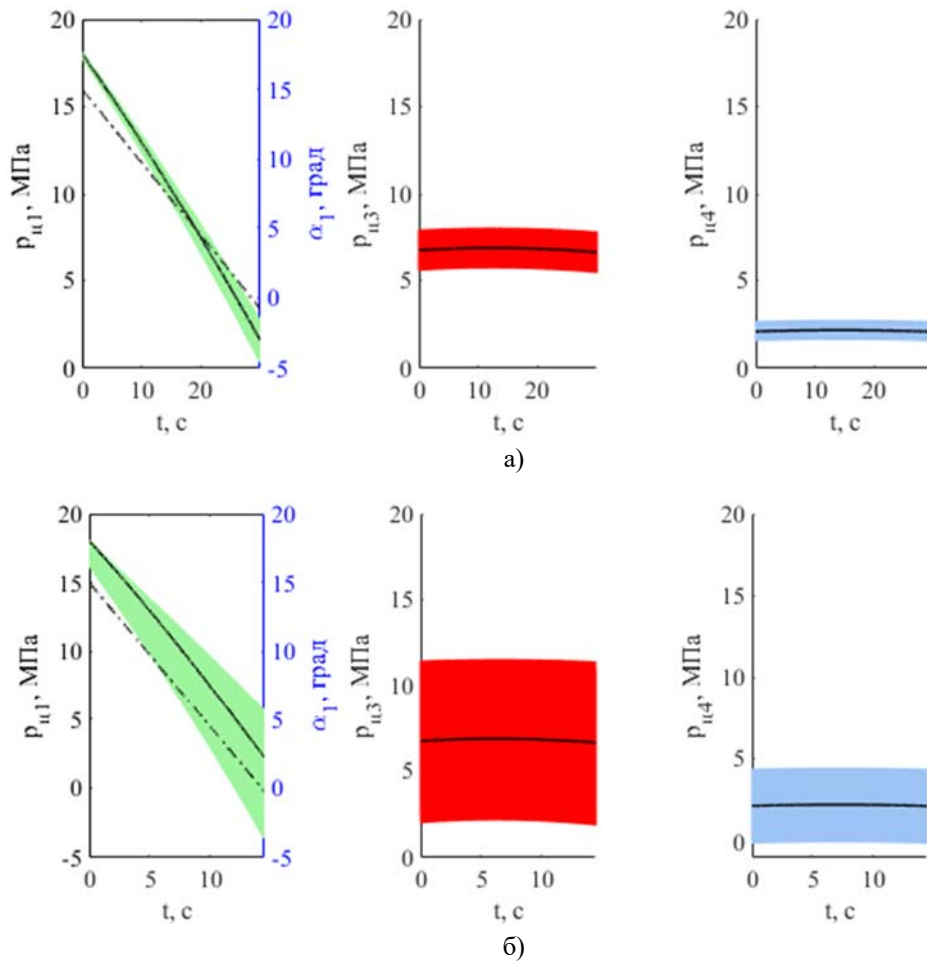


Рисунок 4. Изменение со временем значений давления в гидроцилиндрах  $p_{ц1}, p_{ц3}, p_{ц4}$ , МПа и угла поворота платформы  $\alpha_1$  при работе насоса НШ-34 для  $n_H=350$  об/мин – (а), 700 – (б). Величины  $\varphi_1=0, \theta_1=0, s=0$  (соответствует схеме 5 на рис.4б). Непрерывные кривые соответствуют статическому нагружению по [23].

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 4. Changes over time in the pressure values in the hydraulic cylinders  $p_{ц1}, p_{ц3}, p_{ц4}$ , МПа and the angle of rotation of the platform  $\alpha_1$  during operation of the NSh-34 pump for  $n_H=350$  rpm – (a), 700 – (b). Values  $\varphi_1=0, \theta_1=0, s=0$ .

Source: own calculations

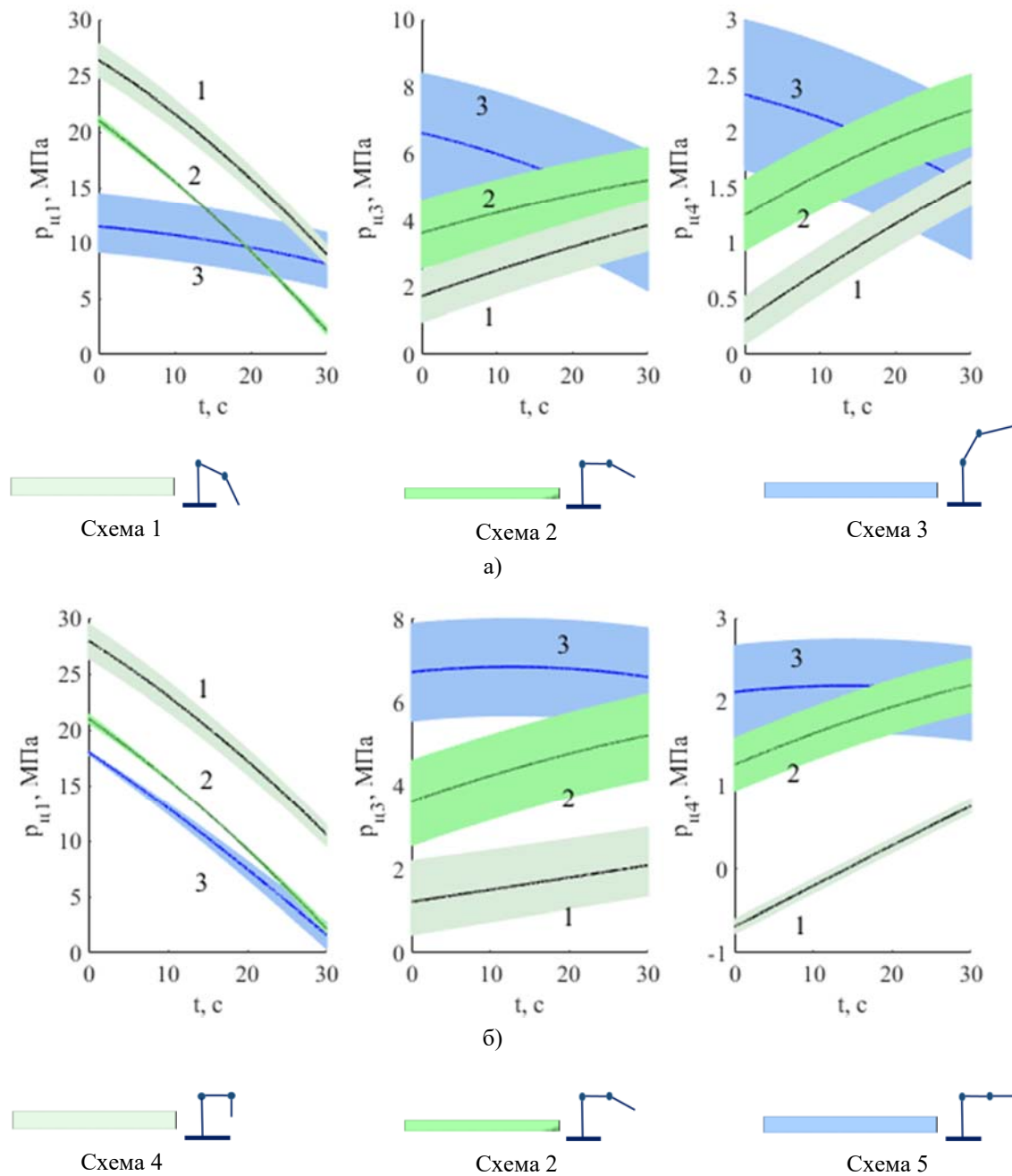


Рисунок 5. Изменение со временем значений давления в гидроцилиндрах  $p_{u1}, p_{u3}, p_{u4}$ , МПа при выравнивании опорно-поворотной платформы с фиксированным положением стрелы, рукояти и груза (насос НШ-34 с частотой вращения вала  $n_H=350$  об/мин),  $s=0$ : а)  $\theta_1=-45^\circ$  и  $\varphi_1=-23^\circ - 1, 0^\circ - 2, 81^\circ - 3$ ; б)  $\varphi_1=0^\circ$  и  $\theta_1=-90^\circ - 1, -45^\circ - 2, 0^\circ - 3$ .

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 5. The change over time in the pressure values in the hydraulic cylinders  $p_{u1}, p_{u3}, p_{u4}$ , МПа when aligning the pivot platform with a fixed position of the boom, handle and load (pump NSh-34 with a shaft rotation speed  $n_H=350$  rpm),  $s=0$ : а)  $\theta_1=-45^\circ$  and  $\varphi_1=-23^\circ - 1, 0^\circ - 2, 81^\circ - 3$ ; б)  $\varphi_1=0^\circ$  and  $\theta_1=-90^\circ - 1, -45^\circ - 2, 0^\circ - 3$ .

Source: own calculations

Зависимости, представленные на рис. 4, показывают, что колебания расхода рабочей жидкости ведут к пульсациям давления на штоки всех гидроцилиндров гидравлического манипулятора. Причем максимальные колебания давления испытывает для рассматриваемой конфигурации звеньев гидроцилиндр стрелы, чье динамическое поведение связано в изучаемом случае только с выравниванием платформы -  $\varphi_1 = \text{const}$ . При этом колебания давления в гидроцилиндре стрелы, а также в гидроцилиндре рукояти ( $\theta_1 = \text{const}$ ) ожидаемо происходят вокруг средних значений, отвечающих решению статической задачи в постановке [23]. В процессе выравнивания опорно-платформы при изменении угла ее наклона к горизонту среднее значение давления в гидроцилиндре аутригера снижается, как и соответствующее равновесное значение. На рис. 4 а, б зависимости равновесных значений давления показаны непрерывными линиями. Изменения угла  $\alpha_1$  со временем показано штрихпунктирной кривой, отнесенной к правой оси ординат.

Влияние динамических эффектов, обусловленных выравниванием опорно-поворотной платформы, приводит к тому, что давление в гидроцилиндре аутригера отклоняется от статического в сторону уменьшения. При этом амплитуда колебаний давления в гидроцилиндре аутригера возрастает, в то время как амплитуды колебаний  $p_{ц3}, p_{ц4}$  остаются практически неизменными. Этот эффект усиливается с ростом частоты вращения шестеренного насоса  $n_n$ . Как видно из сравнения графиков на рис. 3, а и рис. 3, б с увеличением  $n_n$  в два раза от 350 об/мин до 700 об/мин амплитуда колебаний гидроцилиндров увеличивается примерно в 5 раз, что обусловлено, в первую очередь, ростом пульсаций подачи (рис. 3, а). Отметим, что при этом время, необходимое для осуществления выравнивания снижается в 2 раза, т.к. увеличение частоты обеспечивает большую среднюю подачу, а значит более высокие значения скорости поршня аутригера  $v_{O_3}$ -и угловой скорости платформы  $\dot{\alpha}$ .

Рис. 5 иллюстрирует динамику изменения давления на шток гидроцилиндров манипулятора для различных фиксированных положений стрелы и

рукояти относительно платформы, которая переходит в горизонтальное положение за счет работы аутригеров. Схематичное расположение звеньев относительно платформы (после ее выравнивания) показано ниже соответствующего графика.

Поскольку частота вращения вала здесь минимальна для выбранного насоса, средние значения давления в гидроцилиндрах незначительно отличаются от соответствующих значений, рассчитанных по статической модели [23] для данной конфигурации мобильной системы.

Из графиков рис. 5 видно, что давление гидроцилиндра аутригера может достигать критических значений, когда стрела параллельна платформе или опущена (схемы 1 и 4). Соответствующие этим положениям давления в гидроцилиндрах стрелы и рукояти невелики. В этих конфигурациях в процессе выравнивания давления в гидроцилиндре аутригера снижается со временем, одновременно давления в гидроцилиндрах стрелы и рукояти возрастают. Из представленных конфигураций наименьшее давление гидроцилиндра аутригера наблюдается для схем 3 и 5. При этом в случае, соответствующем схеме 3, среднее давление в гидроцилиндре аутригера удерживается в диапазоне 7-14 МПа в течение всего процесса, а для схемы 5 давление здесь снижается от 18 до 2 МПа.

Результаты расчетов показывают, что существенная разгрузка гидроцилиндра аутригера при выравнивании опорно-поворотной платформы в большинстве случаев сопровождается увеличивающейся со временем нагрузкой гидроцилиндров стрелы и рукояти (схемы 1, 2, 4 на рис. 5, а, б).

Сравнение интенсивности пульсаций для различных схем показывает, что для гидроцилиндра аутригера пульсации давления на данной частоте относительно невелики по сравнению амплитудой колебаний статичных элементов мобильной системы – гидроцилиндров стрелы и рукояти, за исключением схемы 4, где для давления гидроцилиндра рукояти  $p_{ц4}$  наблюдается противоположная тенденция (при невысоком значении амплитуды).

### Заключение

В работе представлена математическая модель динамики гидроманипулятора лесотранспортной машины при выравнивании опорно-поворотной

платформы с использованием аутригеров. Расчет давления рабочей жидкости на штоках гидроцилиндров аутригера, стрелы и рукояти позволяют оценить их средние значения, а также амплитуду пульсаций в зависимости от характеристик подачи шестеренного насоса. Моделирование поведения давления в гидроцилиндрах манипуляционной системы проведено для процесса поворота рамы опорно-поворотного устройства при фиксированных положениях остальных звеньев. Показано, что увеличение частоты вращения вала шестеренного насоса приводит к отклонению давления в гидроцилиндре аутри-

гера от значений, полученных в условиях равновесия при соответствующем положении элементов манипулятора и возрастанию здесь амплитуды пульсаций давления по мере выравнивания платформы. Сделаны выводы о влиянии взаимного расположения стрелы, рукояти и рамы на динамику давления рабочей жидкости в гидроцилиндрах манипулятора. Математическая модель может быть использована для анализа динамики гидроманипулятора лесотранспортной машины при совместном движении всех его элементов.

### Приложение 1. Выражения для зависимых переменных в уравнениях (1-4).

Обозначения отрезков соответствуют рис. 2.

$$\begin{aligned}
 Z_2(\alpha, \varphi) &= -\sin \varphi \zeta_x(\alpha) + \cos \varphi \zeta_y(\alpha); \\
 Z_3(\alpha, \theta) &= -\sin \theta \zeta_x(\alpha) + \cos \theta \zeta_y(\alpha); \\
 W_2(\alpha, \varphi) &= -[\cos \varphi \zeta_x(\alpha) + \sin \varphi \zeta_y(\alpha)]; \\
 W_3(\alpha, \theta) &= -[\cos \theta \zeta_x(\alpha) + \sin \theta \zeta_y(\alpha)]; \\
 Z_4(\alpha, \varphi) &= -\cos \varphi \zeta_x(\alpha) + \sin \varphi \zeta_y(\alpha); \\
 Z_5(\alpha, \theta) &= -\cos \theta \zeta_x(\alpha) + \sin \theta \zeta_y(\alpha); \\
 \zeta_x(\alpha) &= -( |OO_2| \sin \alpha - |O_2K_2| \cos \alpha + |O_1K_2| \sin \alpha ); \\
 \zeta_y(\alpha) &= |OO_2| \cos \alpha + |O_2K_2| \sin \alpha + |O_1K_2| \cos \alpha;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_1 &= m_A p_A^2 + (m_{CT} + m_p + m_T + m_{6p}) p_1^2 + I_{zC}^{(A)}; \\
 p_A^2 &= |OO_2|^2 + |O_2K_2|^2 + |CK_2|^2 + 2|OO_2||CK_2|; \\
 |EC_T| &= |EM_3| + s - T/2; \\
 A_2 &= |O_1C_1|^2 m_{CT} + |O_1E|^2 (m_p + m_T + m_{6p}) + I_{zC_1}^{(CT)}; \\
 A_{21} &= |O_1C_1| m_{CT} + |O_1E| (m_p + m_T + m_{6p}); \\
 A_{31} &= m_p |EC_p| + m_T |EC_T| + m_{6p} |EK|; \\
 A_3 &= m_p |EC_p|^2 + m_T |EC_T|^2 + m_{6p} |EK|^2 + I_{zC_p}^{(p)} + I_{zC_T}^{(T)}; \\
 A_{33} &= |O_1E| A_{31}; \\
 A_{41} &= m_T + m_{6p}; \\
 A_{42} &= |O_1E| A_{41}; \\
 A_{43} &= m_T |EC_T| + m_{6p} |EK|;
 \end{aligned}$$

Приложение 2. Координаты точек приложения сил и выражения для определения зависимых геометрических параметров в уравнениях (1-4) по [23].

$x_C =  OO_2 \cos \alpha +  O_2K_2 \cos \alpha_3 +  C_AK_2 \cos \alpha;$ $y_C =  OO_2 \sin \alpha +  O_2K_2 \sin \alpha_3 +  C_AK_2 \sin \alpha;$ $x_{O_1} =  OO_2 \cos \alpha +  O_2K_2 \cos \alpha_3 +  O_1K_2 \cos \alpha;$ $y_{O_1} =  OO_2 \sin \alpha +  O_2K_2 \sin \alpha_3 +  O_1K_2 \sin \alpha;$ $x_{C_1} = x_{O_1} + x_{1C_1}; y_{C_1} = y_{O_1} + y_{1C_1};$ $x_{C_P} = x_{O_1} + x_{1C_P}; y_{C_P} = y_{O_1} + y_{1C_P};$ $x_{C_T} = x_{O_1} + x_{1C_T}; y_{C_T} = y_{O_1} + y_{1C_T};$ $x_{C_{6P}} = x_{O_1} + x_{1C_{6P}}; y_{C_{6P}} = y_{O_1} + y_{1C_{6P}};$ $x_D = x_{O_1} + x_{1D}; y_D = y_{O_1} + y_{1D};$ $x_{D_3} = x_{O_1} + x_{1D_3}; y_{D_3} = y_{O_1} + y_{1D_3};$ $x_{M_2} = x_{O_1} + x_{1M_2}; y_{M_2} = y_{O_1} + y_{1M_2};$	$x_{1C_1} =  O_1C_1 \cos \varphi; y_{1C_1} =  O_1C_1 \sin \varphi;$ $x_{1C_P} = x_{2C_P} +  O_1E \cos \varphi; y_{1C_P} = y_{2C_P} +  O_1E \sin \varphi;$ $x_{1C_T} = x_{2C_T} +  O_1E \cos \varphi; y_{1C_T} = y_{2C_T} +  O_1E \sin \varphi;$ $x_{1C_{6P}} = x_{2C_{6P}} +  O_1E \cos \varphi;$ $y_{1C_{6P}} = y_{2C_{6P}} +  O_1E \sin \varphi;$ $x_{1D} =  O_1D \cos \varphi; y_{1D} =  O_1D \sin \varphi;$ $x_{1D_3} =  O_1D_4 \cos \varphi +  D_4D_3 \cos \beta_2;$ $y_{1D_3} =  O_1D_4 \sin \varphi +  D_4D_3 \sin \beta_2;$ $x_{1M_2} = x_{2M_2} +  O_1E \cos \varphi;$ $y_{1M_2} = y_{2M_2} +  O_1E \sin \varphi$
$x_{2C_P} =  EC_P \cos \theta; y_{2C_P} =  EC_P \sin \theta;$ $x_{2C_T} =  EC_T \cos \theta; y_{2C_T} =  EC_T \sin \theta$ $ EC_T  =  EM_3  + s - T/2;$ $x_{2C_{6P}} =  EK \cos \theta +  KC_{6P} \cos \left(\frac{3\pi}{2} + \alpha_1\right);$ $y_{2C_{6P}} =  EK \sin \theta +  KC_{6P} \sin \left(\frac{3\pi}{2} + \alpha_1\right);$	$ EK  =  EM_3  + s +  M'_2K ;$ $x_{2M_2} =  EM'_2 \cos \theta +  M'_2M_2 \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right);$ $y_{2M_2} =  EM'_2 \sin \theta +  M'_2M_2 \sin \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right);$ $ EM'_2  =  EM_3  + s;$ $x_{2D_3} =  ED_3 \cos(\theta + \gamma_6); y_{2D_3} =  ED_3 \sin(\theta + \gamma_6);$
$\alpha_1 = \pi/2 + \tilde{\alpha} - \alpha; \alpha_3 = \tilde{\alpha} - \alpha_1;$ $\gamma_1 = \pi - \varphi + \theta; \theta < 0;$ $\gamma_6 = 2\pi - (\gamma_1 + \gamma_5);$ $\gamma_5 = \arcsin[z_1 \sin \beta_2 /  ED_3 ];$ $ ED_3  = [z_1^2 + z_2^2 - 2z_1z_2 \cos \beta_2]^{1/2};$ $\gamma_4 = \arcsin(z'_2 \sin \gamma_1 / y_5);$ $\gamma_3 = \arcsin(z'_1 \sin \gamma_2 / y_5);$ $\gamma_2 = \arccos[(y_2 - y_1 - y_4 \cos \gamma_1) / (-y_3)];$ $y_1 = z_1^2 + z_1'^2; y_2 = z_2^2 + z_2'^2;$ $y_3 = 2z_1z_1'; y_4 = 2z_2z_2';$ $y_5 = [z_2^2 + z_2'^2 - 2z_2z_2' \cos \gamma_1]^{1/2}$ $\beta_5 = 2\pi - \beta_3 - \beta_4; \beta_4 = \pi - \varphi - \beta_2;$ $\beta_3 = \arcsin[ D_5D_4  /  D_5D_3  \sin(\pi - \beta_1 - \beta_2)];$ $\beta_2 = \gamma_3 - \gamma_4;$ $\beta_1 = \arcsin[ D_2D_5  / ( D_2D_5 ^2 +  D_2D_4 ^2)^{1/2}];$	$ D_5D_3  = [ D_5D_4 ^2 + z_1^2 - 2 D_5D_4 z_1 \cos(\pi - \beta_1 - \beta_2)]^{1/2};$ $ D_5D_4  = [ D_2D_5 ^2 +  D_2D_4 ^2]^{1/2};$ $\omega = \pi/2 - (\delta - \alpha_3) + \varphi;$ $\delta = \pi/2 - \nu_5;$ $\nu_5 = \pi - \nu_4 - \nu_6;$ $\nu_6 = \arcsin( O_1I_1  /  I_1I_2  \sin \nu_3);$ $ I_1I_2  = [ O_1I_1 ^2 +  O_1I_2 ^2 - 2 O_1I_1  O_1I_2  \cos \nu_3]^{1/2};$ $\nu_4 = \arcsin( O_1C  /  O_1I_2 );$ $ O_1I_1  = (z_4^2 +  O_1D ^2)^{1/2};$ $ O_1I_2  = (z_3^2 +  O_1C ^2)^{1/2};$ $\nu_3 = \pi/2 + \varphi - \alpha_3 - \nu_1 - \nu_2;$ $\nu_2 = \arctg(z_3 /  O_1C );$ $\nu_1 = \arctg(z_4 /  O_1D );$

### Приложение 3. Массовые и геометрические характеристики системы

#### Массовые характеристики

Обозначение	Элемент	
<i>Масса, кг</i>		
$m_K$	рама, поворотная колонна гидроманипулятора, гидроцилиндр и механизм привода стрелы	1070
$m_{бр}$	бревно с грейфером и ротатором	575
$m_C$	стрела с гидроцилиндром и механизмом привода рукояти	325
$m_P$	рукоять без телескопического удлинителя с гидроцилиндром привода телескопического удлинителя	225
$m_T$	телескопический удлинитель	150
$m_{авт}$	автомобиль	21000
<i>Момент инерции элемента относительно его центра тяжести, кг·м<sup>2</sup></i>		
$I_{z_C}^{(A)}$	автомобиль вместе с рамой, поворотной колонны гидроманипулятора, гидроцилиндром и механизмом привода стрелы	33914
$I_{z_{C_1}}^{(ст)}$	стрела с гидроцилиндром и механизмом привода рукояти	500
$I_{z_{C_P}}^{(P)}$	рукоять без телескопического удлинителя с гидроцилиндром привода телескопического удлинителя	100
$I_{z_{C_T}}^{(T)}$	телескопического удлинителя	12.5

#### Геометрические характеристики. Обозначения отрезков соответствуют рис. 2

Обозначение	Примечание	Значение, мм
<i>Зона стрелы манипулятора</i>		
$O_1E$	Длина стрелы	4300
$O_1C_1$	$C_1$ - центр тяжести стрелы с гидроцилиндром и механизмом привода рукояти	2100
$O_1D_2$		2455
$O_1D$		660
$D_2D_4$		1370
$D_2D_5$		300
$z_1, z'_1$	Элементы привода рукояти	546, 800
$z_2, z'_2$	Элементы привода рукояти	475, 305
$z_3, z_4$	Элементы привода стрелы	320, 200
<i>Зона рукояти и телескопической части манипулятора</i>		
$EM_3$	Длина рукояти	2300
$T$	Длина телескопического удлинителя (максимальная)	1000
$M_2'K$		200
$M_2'M_2$		0
$EC_P$	$C_P$ - центр тяжести рукояти без телескопического удлинителя с гидроцилиндром привода телескопического удлинителя	1000
$KC_{бр}$		1000
<i>Автомобиль и колонна манипулятора</i>		
$OA=L$	Расстояние между аутригерами. $OA = O_2O_3$ . $O_2K_2 = K_2O_3$ .	3800
$OO_2$	Высота левого аутригера, установленного в рабочее положение	1500
$O_1K_2$	Высота колонны	1915
$O_1C$	$C$ – центр тяжести автомобиля вместе с опорно-поворотным устройством и колонной	1220

## Список литературы

1. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: монография / З. К. Емтыль, И. М. Баргтнев, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, А. П. Татаренко, Л. Д. Бухтояров; под ред. д-ра техн. наук, проф. И. М. Баргтнева. – М. : ФЛИНТА : Наука, 2011.- 408 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20403683>.
2. Jeng S., Yang C., Chieng W. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2010. V. 38. P. 145–170. DOI: 10.1080/15397730903482702.
3. Попиков, П. И. Экспериментальные исследования динамики гидропривода механизма подъема лесного манипулятора // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2012. – № 75. – С. 407-418. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17305469>
4. Математическое моделирование процессов в системе гидропривода лесных манипуляторов / П. И. Попиков, П. И. Титов, А. А. Сидоров [и др.] // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2011. – № 69. – С. 96-106. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16391482>
5. Лагерев, И. А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов: монография / И. А. Лагерев. – Брянск : РИО БГУ, 2016. – 371 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29647139>.
6. Urbaś A. Computational implementation of the rigid finite element method in the statics and dynamics analysis of forest cranes // *Applied Mathematical Modelling*. 2017. V. 46. P. 750–762. DOI: 10.1016/j.apm.2016.08.006.
7. Feau C., Politopoulos I., Kamaris G. S., Mathey C., Chaudat T., Nahas G. Experimental and numerical investigation of the earthquake response of crane bridges. *Engineering Structures* 2015. V. 84. P. 89–101. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.
8. Alhaddad W., Halabi Y., Xu H., Lei H. Outrigger and Belt-Truss System Design for High-Rise Buildings: A Comprehensive Review Part II – Guideline for Optimum Topology and Size Design. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–30. DOI: 10.1155/2020/2589735.
9. Колесников П. Г., Моисеев Г. Д. Моделирование режимов работы телескопического гидроманипулятора // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2017. – № 50. – С. 14-17. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30763326>.
10. Полетайкин В. Ф., Гуськов С. Ю. Лесопогрузчики перекидного типа с изменяющимся центром вращения технологического оборудования. *Динамика элементов конструкции: монография*. – Красноярск: СибГТУ, 2013. – 156 с.
11. Авдеева Е. В., Полетайкин В. Ф. Исследование нагрузок на гидроцилиндры манипулятора // *Хвойные бореальной зоны*. 2020. Т. 38. № 5-6. С. 305-309. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44597525>.
12. Колесников П. Г., Моисеев Г. Д. Расчет устойчивости лесной машины // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2017. № 50. С. 11-13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30763325>.
13. Колесников П. Г., Моисеев Г. Д. Обоснование параметров устойчивости форвардеров-сортиментовозов // *Новые материалы и технологии в машиностроении*. – 2016. – № 24. – С. 83-86. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27320575>.
14. Лагерев А. В., Лагерев И. А. Моделирование рабочих процессов в дроссельно-регулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при раздельном движении звеньев // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. – 2018. - № 4. – С. 355-379. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379.
15. Лагерев А. В., Лагерев И. А. Моделирование рабочих процессов в частотно-регулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при раздельном движении звеньев // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. – 2019. - № 2. – С. 187-209. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-187-209.

16. Бычков, И. С. Оценка устойчивости грузоподъемного крана, оборудованного грунтовыми якорями // Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". 2017. Т. 3(55). С. 7-11. DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3\(55\)-7-11](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-7-11).
17. Лагереv И. А., Лагереv А. В. Повышение безопасности эксплуатации мобильных транспортно-технологических машин с манипуляционными системами при работе с аутригерами // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017; 3: 296-302. – DOI 10.22281/2413-9920-2017-03-03-296-302.
18. Qian J., Bao L., Yuan R., Yang X. Modeling and Analysis of Outrigger Reaction Forces of Hydraulic Mobile Crane // International Journal of Engineering Transactions. B: Applications. 2017. V. 30, № 8. P. 1246-1252. DOI: 10.5829/ije.2017.30.08b.18.
19. Дахиеv Ф. Ф., Раевская Л. Т. Расчет обобщенных сил лесного манипулятора с четырьмя степенями свободы. Современные проблемы науки и образования. 2015; 1-1: 75. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25323100>.
20. Добрачев А. А., Раевская Л. Т., Швец А. В. Кинематические схемы, структуры и расчет параметров лесопромышленных манипуляторных машин: монография. – Екатеринбург, 2014. – 128 с. – ISBN 978-5-94984-450-2. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22460987>.
21. Попиков П. И., Танчук П. В. Повышение эффективности погрузочно-разгрузочных работ гидроманипуляторов лесотранспортных машин с выравнителями опорных платформ // Воронежский научно-технический вестник. 2019. Т. 30. № 4. С. 95-100. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41586856>.
22. Патент № 2762905 С1 Российская Федерация, МПК В66С 23/80, В66С 13/18, А01G 23/00. Гидросистема механизма выравнивания опорно-поворотного устройства гидроманипулятора лесотранспортной машины : № 2021116628 : заявл. 07.06.2021 : опубл. 23.12.2021 / П. И. Попиков, П. В. Танчук, В. П. Попиков, Р. В. Юдин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова". URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2762905C1\\_20211223](https://yandex.ru/patents/doc/RU2762905C1_20211223).
23. Статическое нагружение силового гидропривода звеньев манипулятора лесотранспортной машины в критическом режиме / О. Р. Дорняк, Л. В. Маркова, С. К. Попиков, П. В. Танчук // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 87–104. – Библиогр.: с. 100–104 (29 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/5>.
24. Яблонский А. А., Никифорова В. М. Курс теоретической механики: статика, кинематика, динамика: учеб. - 16-е изд., стер. - М.: КноРус, 2011. - 603 с.
25. Башта, Т. М. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
26. Хавронин В. П., Несмиянов И. А. Исследование неравномерности подачи рабочей жидкости шестерёнными насосами // Современная техника и технологии. 2012. № 3. URL: <https://technology.snauka.ru/2012/03/415> (дата обращения: 12.07.2023).
27. Жаров В. П., Рыбак А. Т., Фридрих Р. А. Моделирование и экспериментальные исследования гидромеханической системы со знакопеременной нагрузкой // Вестник ДГТУ, 2006. Т.6. №1(28). С. 17-24. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23074487>.
28. Шестеренный насос – высокопроизводительный. URL: [https://ah-rf.ru/images/companies/5/blog/argohytos%20russian/nasosu/%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%8B%20GP1\\_RU.pdf?1500562700958](https://ah-rf.ru/images/companies/5/blog/argohytos%20russian/nasosu/%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%8B%20GP1_RU.pdf?1500562700958).

### References

1. *Gidromanipulyatory i lesnoe tekhnologicheskoe oborudovanie: monografiya* [Hydraulic manipulators and forest processing equipment]. Z.K. Emtyl', I.M. Bartenev, M.V. Drapalyuk, P.I. Popikov, A.P. Tatarenko, L.D. Bukhtoyarov; pod red. d-ra tekhnicheskikh nauk, prof. I.M. Barteneva. – Moscow : FLINTA : Nauka, 2011.- 408 p. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20403683>.



2. Jeng S., Yang C., Chieng W. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2010. V. 38. P. 145–170. DOI: 10.1080/15397730903482702.
3. Popikov, P. I. Eksperimental'nye issledovaniya dinamiki gidroprivoda mekhanizma pod"ema lesnogo manipulyatora [Experimental studies of the dynamics of the hydraulic drive of the lifting mechanism of the forest manipulator]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University]. – 2012. – No 75. – pp. 407-418. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17305469>.
4. Matematicheskoe modelirovanie protsessov v sisteme gidroprivoda lesnykh manipulyatorov [Mathematical modeling of processes in the hydraulic drive system of forest manipulators]. P. I. Popikov, P. I. Titov, A. A. Sidorov [et al.]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University]. – 2011. – No. 69. – pp. 96-106. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16391482>.
5. Lagerev I. A. *Modelirovanie rabochnykh protsessov manipulyatsionnykh sistem mobil'nykh mnogotselyvykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov: monografiya* [Modeling of work processes of manipulation systems of mobile multipurpose transport and technological machines and complexes: monograph]. – Bryansk: RIO BGU, 2016. – 371 p. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29647139>.
6. Urbaś A. Computational implementation of the rigid finite element method in the statics and dynamics analysis of forest cranes // *Applied Mathematical Modelling*. 2017. V. 46. P. 750–762. DOI: 10.1016/j.apm.2016.08.006.
7. Feau C., Politopoulos I., Kamaris G. S., Mathey C., Chaudat T., Nahas G. Experimental and numerical investigation of the earthquake response of crane bridges. *Engineering Structures* 2015. V. 84. P. 89–101. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.
8. Alhaddad W., Halabi Y., Xu H., Lei H. Outrigger and Belt-Truss System Design for High-Rise Buildings: A Comprehensive Review Part II – Guideline for Optimum Topology and Size Design. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–30. DOI:10.1155/2020/2589735.
9. Kolesnikov P. G., Moiseev G. D. Modelirovanie rezhimov raboty teleskopicheskogo gidromanipulyatora [Modeling of operating modes of a telescopic hydraulic manipula]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex]. – 2017. – No. 50. – pp. 14-17. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30763326>.
10. Poletaykin V. F., Gus'kov S. Yu. *Lesopogruzchiki perekidnogo tipa s izmenyayushchimsya tsentrom vrashcheniya tekhnologicheskogo oborudovaniya. Dinamika elementov konstruksii: monografiya* [Swing-type loaders with a changing center of rotation of technological equipment. Dynamics of structural elements: monograph]. Krasnoyarsk: SibGTU, 2013. – 156 p. (In Russ.).
11. Avdeeva E.V., Poletaykin V.F. Issledovanie nagruzok na gidrotsilindry manipulyatora [Investigation of loads on hydraulic cylinders of the manipulator]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Coniferous boreal zones]. 2020. V. 38. No. 5-6. pp. 305-309. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44597525>
12. Kolesnikov P. G., Moiseev G. D. Raschet ustoychivosti lesnoy mashiny [Calculation of the stability of a forest machine]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex]. 2017. No 50. pp. 11-13. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30763325>
13. Kolesnikov P. G., Moiseev G. D. Obosnovanie parametrov ustoychivosti forvarderov-sortimentovozov [Substantiation of stability parameters of forwarders-sorting trucks]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New materials and technologies in mechanical engineering]. – 2016. – No. 24. – pp. 83-86. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27320575>
14. Lagerev A. V., Lagerev I. A. Modelirovanie rabochnykh protsessov v drossel'no-reguliruемом gidroprivode manipulyatsionnykh sistem mobil'nykh mashin pri razdel'nom dvizhenii zven'ev [Modeling of work processes in a throttle-controlled hydraulic drive of manipulation systems of mobile machines with separate movement of links].

*Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and technical bulletin of the Bryansk State University]. – 2018. – No 4. – pp. 355-379. (In Russ.). DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379

15. Lagerev A. V., Lagerev I. A. Modelirovanie rabochikh protsessov v chastotno-reguliruemom gidroprivode manipulyatsionnykh sistem mobil'nykh mashin pri razdel'nom dvizhenii zven'ev [Modeling of work processes in a frequency-controlled hydraulic drive of manipulation systems of mobile machines with separate movement of links]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and technical bulletin of the Bryansk State University]. 2019. – No 2. – pp. 187-209. (In Russ.). DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-187-209.

16. Bychkov I. S. Otsenka ustoychivosti gruzopod"emnogo krana, oborudovannogo gruntovymi yakoryami [Assessment of the stability of a lifting crane equipped with ground anchors]. *Nauchnyy retsenziruemyy zhurnal "Vestnik SibADI"* ["Bulletin of SibADI"]. 2017. V. 3(55). pp. 7-11. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3\(55\)-7-11](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-3(55)-7-11).

17. Lagerev I. A., Lagerev A. V. Povyshenie bezopasnosti ekspluatatsii mobil'nykh transportno-tekhnologicheskikh mashin s manipulyatsionnymi sistemami pri rabote s autrigrami [Improving the safety of operation of mobile transport and technological machines with manipulation systems when working with outriggers]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific and technical bulletin of the Bryansk State University]. 2017. No. 3: pp. 296-302. (In Russ.). DOI 10.22281/2413-9920-2017-03-03-296-302.

18. Qian J., Bao L., Yuan R., Yang X. Modeling and Analysis of Outrigger Reaction Forces of Hydraulic Mobile Crane // *International Journal of Engineering Transactions. B: Applications*. 2017. V. 30, № 8. P. 1246-1252. DOI: 10.5829/ije.2017.30.08b.18.

19. Dakhiev F. F., Raevskaya L. T. Raschet obobshchennykh sil lesnogo manipulyatora s chetyr'mya stepenyami svobody [Calculation of generalized forces of a forest manipulator with four degrees of freedom]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2015; 1-1: 75. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25323100>.

20. Dobrachev A. A., Raevskaya L. T., Shvets A. V. *Kinematicheskie skhemy, struktury i raschet parametrov lesopromyshlennykh manipulyatornykh mashin: monografiya* [Kinematic schemes, structures and calculation of parameters of timber manipulator machines: monograph]. – Yekaterinburg, 2014. 128 p. – ISBN 978-5-94984-450-2. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22460987>.

21. Popikov P. I., Tanchuk P. V. Povyshenie effektivnosti pogruzochno-razgruzochnykh robot gidromanipulyatorov lesotransportnykh mashin s vyravnivatelyami opornykh platform [Improving the efficiency of loading and unloading operations of hydraulic manipulators of forest transport machines with levellers of support platforms]. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiy vestnik* [Voronezh Scientific and Technical Bulletin]. 2019. V. 30. No. 4. pp. 95-100. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41586856>.

22. Patent № 2762905 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B66C 23/80, B66C 13/18, A01G 23/00. Gidrosistema mekhanizma vyravnivaniya oporno-povorotnogo ustroystva gidromanipulyatora lesotransportnoy mashiny [Hydraulic system of the alignment mechanism of the pivoting device of the hydraulic manipulator of the forest transport machine] : No. 2021116628 : application. 07.06.2021 : publ. 23.12.2021 / P. I. Popikov, P. V. Tanchuk, V. P. Popikov, R. V. Yudin; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskiy universitet imeni G.F. Morozova". URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2762905C1\\_20211223](https://yandex.ru/patents/doc/RU2762905C1_20211223).

23. Stichesko nagruzhenie silovogo gidroprivoda zven'ev manipulyatora lesotransportnoy mashiny v kriticheskom rezhime [Static loading of the power hydraulic drive of the links of the manipulator of a timber transport machine in critical mode] O. R. Dorniyak, L. V. Markova, S. K. Popikov, P. V. Tanchuk // *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering journal]. – 2023. – V. 13. – No 2 (50). – pp. 87–104. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/5>.

24. Yablonskiy A. A., Nikiforova V. M. *Kurs teoreticheskoy mekhaniki: statika, kinematika, dinamika: ucheb.* [Course of theoretical mechanics: statics, kinematics, dynamics: textbook]. - 16-e izd., ster. - Moscow: KnoRus, 2011. - 603 p. (In Russ.).
25. Bashta T. M. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. – Moscow : Mashinostroenie, 1982. – 423 p. (In Russ.).
26. Khavronin V. P., Nesmiyanov I. A. Issledovanie neravnomernosti podachi rabochey zhidkosti shesterennymi nasosami [Investigation of the uneven supply of working fluid by gear pumps]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii* [Modern engineering and technologies]. 2012. No. 3. URL: <https://technology.snauka.ru/2012/03/415> (date of reference: 12.07.2023).
27. Zharov V.P., Rybak A.T., Fridrikh R.A. Modelirovanie i eksperimental'nye issledovaniya gidromekhanicheskoy sistemy so znakoperemennoy nagruzkoy [Modeling and experimental studies of a hydromechanical system with alternating load]. *Vestnik DGTU* [Bulletin of DSTU], 2006. V.6. No. 1(28). pp. 17-24. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23074487>
28. Shesterennyy nasos – vysokoproizvoditel'nyy [The gear pump is high-performance]. URL: [https://ahrf.ru/images/companies/5/blog/argohytos%20russian/nasosu/%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%8B%20GP1\\_RU.pdf?1500562700958](https://ahrf.ru/images/companies/5/blog/argohytos%20russian/nasosu/%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%8B%20GP1_RU.pdf?1500562700958).

### Сведения об авторах

✉ *Дорняк Ольга Роальдовна* – доктор технических наук, зав. кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>; e-mail: [ordornyak@mail.ru](mailto:ordornyak@mail.ru).

*Маркова Людмила Васильевна* – кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории реофизики и макрокинетики Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, ул. П. Бровки, 15, г. Минск, 220072, Беларусь, e-mail: [l\\_v\\_markova@mail.ru](mailto:l_v_markova@mail.ru).

*Танчук Павел Владимирович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: [pavlentpv@mail.ru](mailto:pavlentpv@mail.ru).

*Попиков Сергей Константинович* – Институт комплексного проектирования автомобильных дорог, ул. Депутатская, 11, г. Воронеж, 394055, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>; e-mail: [sergpopikov@mail.ru](mailto:sergpopikov@mail.ru).

### Information about the authors

✉ *Olga R. Dorniyak* – Dr. Sci. (Tech.), Head of the department of electrical equipment, heating engineers and hydraulics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>; e-mail: [ordornyak@mail.ru](mailto:ordornyak@mail.ru).

*Lyudmila V. Markova* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), senior researcher of Rheophysics and Macrokinetics lab A.V. Luikov Heat and mass transfer institute of the national academy of sciences of Belarus, Brovki str., 15, Minsk, 220072, Belarus, e-mail: [l\\_v\\_markova@mail.ru](mailto:l_v_markova@mail.ru).

*Pavel V. Tanchuk* – Postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: [pavlentpv@mail.ru](mailto:pavlentpv@mail.ru).

*Sergei K. Popikov* – Head of the group, Institute for Integrated Design of Highways, Deputatskaya str., 11, Voronezh, 394055, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, [sergpopikov@mail.ru](mailto:sergpopikov@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/11>


УДК 630.232.216




## Оптимизация параметров лесного плуга для образования микроповышений на основе множественного регрессионного анализа

Денис Ю. Дручинин✉, druchinin.denis@rambler.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

Максим А. Попов, popovmaxim98@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>

Сергей В. Зимарин, sezimarin@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6822-624X>

Александр И. Третьяков, tret'yakov-ai@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0006-5834-1010>

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

Тасжные лесные ландшафты РФ, являясь основной частью бореальных лесов нашей планеты, в настоящее время подвергаются интенсивной эксплуатации. Проводимое после заготовки древесины лесовосстановление на таких площадях часто включает обработку почвы в виде образования пластов, гряд или линейных микроповышений ввиду преобладания временно переувлажняемых или влажных почв. Эффективность подготовки переувлажненной почвы микроповышениями напрямую зависит от конструктивно-технологических параметров лесного плуга, сочетающего лемешно-отвальную корпус и сферические диски. В почвенном канале проведена серия экспериментов по тензометрическим замерам величин тягового сопротивления лесного плуга и линейных размеров образуемого им микроповышения. Регрессионные модели влияния конструктивных параметров плуга и влажности почвы адекватны экспериментальным значениям тягового сопротивления ( $F = 13,847$ ,  $p = 0,000334$ ) и высоты микроповышения ( $F = 20,646$ ,  $p = 0,000045$ ). На основании составленных моделей проведена оптимизация ряда параметров элементов конструкции лесного плуга с использованием функции желательности Харрингтона. Были установлены оптимальные значения угла атаки и угла наклона сферических дисков, расстояние от центра их вращения до кромки отвала корпусов, а также оценено влияние влажности обрабатываемой почвенной среды на исследуемые выходные характеристики работы плуга. Полученные результаты могут быть использованы при выполнении опытно-конструкторских работ по созданию современной лесной почвообрабатывающей техники.

**Ключевые слова:** бореальные леса, лесовосстановление, переувлажненные почвы, микроповышение, лесной плуг, параметры конструкции, регрессионный анализ, оптимизация

**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:** Оптимизация параметров лесного плуга для образования микроповышений на основе множественного регрессионного анализа / Д. Ю. Дручинин, М. А. Попов, С. В. Зимарин, А. И. Третьяков // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 188–203. – Библиогр.: с. 200–202 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/11>.

Поступила 01.04.2024. Пересмотрена 22.04.2024. Принята 23.04.2024. Опубликована онлайн 17.06.2024.

Article

## Optimization of the forest plow parameters for receiving microhills based on multiple regression analysis

Denis Yu. Druchinin✉, druchinin.denis@rambler.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

Maksim A. Popov, popovmaxim98@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>

Sergey V. Zimarin, sezimarin@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6822-624X>

Alexander I. Tretyakov, tretyakov-ai@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0006-5834-1010>

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

### Abstract

The taiga forest landscapes of the Russian Federation, being the main part of the boreal forests of our planet, are currently undergoing intensive exploitation. Reforestation carried out after harvesting in such areas often includes tillage in the form of formation of layers, ridges or linear microhills due to the predominance of temporarily moistened or wetland soils. The effectiveness of the preparation of waterlogged soil by microhills directly depends on the structural and technological parameters of a forest plow combining plow bottom and spherical discs. A series of experiments on strain gauge sampling of a forest plow draught resistance of and the linear dimensions of the microhill formed by it were carried out in the soil channel. Regression models of the influence of plough design parameters and soil moisture are adequate to the experimental values of draught resistance ( $F = 13.847$ ,  $p = 0.000334$ ) and microhill height ( $F = 20.646$ ,  $p = 0.000045$ ). Based on the compiled models, a number of parameters of the forest plow structural elements were optimized using the Harrington desirability function. The optimal values of the approach angle and the angle of inclination of spherical disks, the distance from the center of their rotation to the edge of the plow bottom earthboard were determined, and the influence of humidity of the treated soil environment on the estimated output characteristics of the plow was estimated. The results obtained can be used in the implementation of research and development on the creation of modern forest tillage equipment.

**Keywords:** *boreal forests, reforestation, wetland soils, microhill, forest plow, design parameters, regression analysis, optimization*

**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:** Druchinin D. Yu., Popov M. A., Zimarin S. V., Tretyakov A. I. (2024). Optimization of the forest plow parameters for receiving microhills based on multiple regression analysis. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 188-203 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/11>.

*Received* 01.04.2024. *Revised* 22.04.2024. *Accepted* 23.04.2024. *Published online* 17.06.2024.

### Введение

Российская Федерация, являясь ведущей лесной державой, сосредоточила на своей площади, по разным оценкам, около четверти мирового запаса древесных ресурсов [1]. Однако в целом ряде работ отмечается, что в настоящее время вследствие активного освоения доступной лесосырьевой базы, особенно в зонах с умеренным климатом, заготовка древесины перемещается в бореальные широты<sup>21</sup> [2-4].

Леса бореальной зоны, находясь между 50 и 70 градусами северной широты, являются одним из основополагающих климатообразующих факторов нашей планеты, так как *поглощают из атмосферы Земли до 17 % углекислого газа* [5]. Наибольшая площадь бореальных лесов сосредоточена в нашей стране, поэтому обеспечение устойчивого лесопользования таежных ландшафтов делает их охрану и своевременное восстановление одними из основных видов деятельности для лесной отрасли РФ.

В работах [4, 6] А.С. Ильинцев с соавторами, а также А.А. Дымов указывают на то, что в условиях бореальных широт доступная лесосека переходит с участков с дренированными почвами на площади с временным переувлажнением или избыточным увлажнением, часто преобладающие в таежных условиях. С учетом принятия в нашей стране Концепции интенсивного использования и воспроизводства лесов это вызывает необходимость проведения лесовосстановительных работ, в частности, обработки почвы, на вырубках с избытком влаги [5].

В статье Казакова В.И. и соавторов [7] отмечено, что механическая обработка временно или избыточно переувлажненных лесных почв выполняется с использованием специальных лесных плугов, например, ПЛД-1,2 или ПЛМ-1,5, которые создают линейные микроповышения в виде гряд.

М. Ramantswana и др. в работе [8] сделали вывод о том, что плужная обработка почвы в лесных условиях невозможна без создания и использования современных образцов эффективных технических средств. Аналогичный вывод о необходимости использования средств механизации при подготовке

участков к лесовосстановлению для улучшения приживаемости и последующего развития создаваемых культур сделан М. Löff и соавторами [9].

Механизация лесохозяйственных работ позволяет повысить экономическую эффективность и результативность их проведения.

Качество подготовки почвы, как было установлено на основе полевых опытов К. Uotila и др., существенно влияет на последующее развитие создаваемых насаждений [10].

В ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова на основании анализа конструктивных и технологических особенностей серийных образцов лесных почвообрабатывающих орудий разработана конструкция лесного плуга для образования линейных микроповышений [11]. Орудие включает следующие основные узлы (рис. 1): раму 1, механизм навески 2, подвижный брус 3 с расположенными на нем лемешно-отвальными корпусами 4, сферические диски 5 и каток-уплотнитель 6 для формирования профиля и плотной структуры микроповышения.

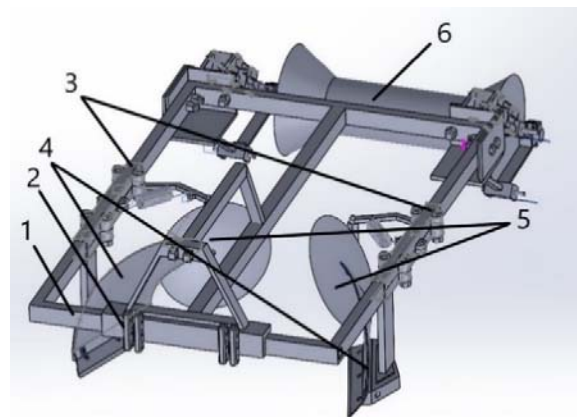


Рисунок 1. Разработанная конструкция лесного плуга для образования микроповышений

Источник: собственная схема авторов

Figure 1. The developed design of a forest plow for the microhills formation

Source: authors' own scheme

Помимо конструирования, важным этапом при разработке нового технического устройства яв-

<sup>21</sup> Кармакова М. Руби – не хочу: сколько леса в России доступно для заготовки? // Лесной комплекс. 2021; 4(50): 24-32. URL:

<https://forestcomplex.ru/forestry/rubi-ne-hochu-skolko-lesa-v-rossii-dostupno-dlya-zagotovki/>

ляется определение его оптимальных компоновочных, конструктивных и технологических параметров. Для этого выполняются теоретические и экспериментальные исследования с использованием соответственно математического моделирования и физических моделей (экспериментальных образцов, лабораторных установок и т.д.).

Ранее авторами для определения оптимальных диапазонов параметров конструктивных узлов разрабатываемого лесного плуга была составлена формализованная модель перемещения почвенных масс по лемешно-отвальной поверхности и сферическим дискам орудия для укладки в микроповышение [12].

Целью работы является решение оптимизационной задачи для многообразия конструктивно-технологических параметров и факторов почвенной среды, влияющих на процесс работы лесного плуга для создания линейных микроповышений на переувлажненных почвах.

## Материалы и методы

### Предмет и объект исследования

Объектом исследования является процесс образования линейного микроповышения при работе лесного плуга с комбинированными лемешно-отвальными и дисковыми рабочими органами.

Предмет исследования – определенные экспериментальным путем закономерности влияния конструктивных параметров лесного плуга (углы установки  $\alpha$  и  $\beta$  сферического диска, расстояние  $L$  от оси диска до кромки отвала) и характеристик обрабатываемой почвенной среды (влажность почвы  $W$ ) на величину тягового сопротивления орудия и высоту образуемого им микроповышения.

### Дизайн эксперимента

Для достижения поставленной цели исследования была составлена программа лабораторных исследований. Она подразумевала проведение экспериментальных замеров тягового сопротивления  $R_n$  и высоты создаваемого микроповышения  $h$  как критериев эффективности работы орудия  $Y_1$  и  $Y_2$  в зависимости от комбинации входных независимых переменных.

На этапе обобщенной постановки задачи эксперимента необходимо было определить количество

исследуемых параметров и их вариативность. Для этого было выполнено априорное ранжирование факторов [13, 14].

На основе априорного ранжирования в качестве независимых входных факторов для изучения их влияния на тяговое сопротивление и поперечный профиль микроповышения были отобраны следующие параметры конструкции лесного плуга: угол атаки  $\alpha$  сферического диска ( $X_1$ ); угол наклона  $\beta$  сферического диска в вертикальной плоскости ( $X_2$ ); расстояние  $L$  от оси диска до кромки отвала ( $X_3$ ). Из свойств обрабатываемой почвенной среды был выбран неуправляемый в реальных условиях параметр – влажность почвы  $W$  ( $X_4$ ).

Графическое представление постановки задачи на эксперимент имеет следующий вид (рис. 2).



Рисунок 2. Постановка задачи для лабораторного исследования

Figure 2. Setting a task for laboratory research

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Оптимизационная задача, решаемая по итогам лабораторного исследования, заключалась в подборе такой комбинации задействованных в эксперименте параметров, которые позволяют достичь максимальной высоты микроповышения при минимальном тяговом сопротивлении разрабатываемого лесного плуга

$$\begin{cases} R_n(\alpha, \beta, L, W) \rightarrow \min \\ h(\alpha, \beta, L, W) \rightarrow \max \end{cases} \quad (1)$$

Намеченные граничные уровни входных факторов и интервалы их варьирования представлены в табл. 1.

Граничные условия исследуемых факторов

Table 1

Boundary conditions of the studied factors

Код / Code	Фактор / The factor	Уровень варьирования / The level of variation			Интервал варьирования / The variation interval $\Delta_i$
		нижний / lower, $X_i^{(-)}$	основной / main, $X_i^{(0)}$	верхний / upper, $X_i^{(+)}$	
$X_1$	Угол атаки / Approach angle $\alpha$	45°	50°	55°	5°
$X_2$	Угол установки диска в вертикальной плоскости / Setting angle of the disc in the vertical plane $\beta$	0°	7.5°	15°	7.5°
$X_3$	Расстояние от оси диска до отвала / The distance from the axis of the disc to the earthboard $L$	-50 мм / mm	0 мм / mm	50 мм / mm	50 мм / mm
$X_4$	Влажность почвы / Soil moisture $W$	30%	45%	60%	15%

Источник: собственные данные авторов / Source: author's own data

С использованием метода планирования многофакторного эксперимента согласно формулы числа опытов  $2^x$  была составлена кодированная матрица планирования эксперимента для четырех исследуемых факторов  $X^{22}$ . Исследование проводилось согласно заранее составленной методике в специальном почвенном канале кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин<sup>23</sup>.

Для проведения запланированной серии экспериментов была создана лабораторная установка в виде одной рабочей секции разработанного плуга для образования микроповышений, содержащая тележку с электродвигателем 1, навеску тележки 2, тензонавеску 3, S-образный тензодатчик 4 модели UU-K500, раму 5, опорное колесо 6, лемешно-отвальный корпус 7 и сферический диск 8 (рис. 3).



Рисунок 3. Установка для проведения лабораторных экспериментов по исследованию рабочего процесса лесного плуга / Figure 3. Apparatus for conducting laboratory experiments to study the forest plow working process

Источник: собственное фото авторов / Source: authors' own photo

<sup>2</sup> Адлер Ю. А., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва : Наука, 1976. 139 с.

<sup>23</sup> Рязанова Т.В., Демиденко Н.Ю., Почкутов И.С., Еременко О.Н. Планирование, организация, проведение эксперимента и патентование : учеб. пособие. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019. 88 с.



Скорость движения экспериментальной установки составляла 0,26 м/с (1 км/ч). Глубина хода рабочих органов в процессе исследований была постоянной и равнялась 150 мм.

### Анализ данных

Требуемые опыты из матрицы планирования выполнялись с трехкратным повтором, после чего

полученные данные по каждому показателю эффективности подвергались первичной статистической обработке и усреднению с использованием программных средств математической статистики.

Рассчитанные значения выходных критериев эффективности рабочего процесса лесного плуга для каждого эксперимента, согласно матрице планирования, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Усредненные результаты выполненных экспериментальных исследований

Table 2

The average results of the performed experimental studies

№ опыта / Experience Number	X <sub>1</sub> (угол α, град. / angle α, degree)	X <sub>2</sub> (угол β, град. / angle β, degree)	X <sub>3</sub> (расстояние L от оси диска до отвала, мм / distance L from the axis of the disc to the earthboard, mm)	X <sub>4</sub> (влажность почвы W, % / soil moisture W, %)	Y <sub>1</sub> , Сопротивление орудия R <sub>n</sub> , Н / Draught resistance R <sub>n</sub> , N	Y <sub>2</sub> , Средняя высота микроповышения h, мм / The average height of the microhill h, mm
1	55	0	-50	30	1423,67	48,5
2	45°	0°	-50	30%	1310,37	37,8
3	55°	15°	-50	30%	1383,5	33,6
4	45°	15°	-50	30%	1320,82	25,3
5	55°	0°	50	30%	1794,56	44,9
6	45°	0°	50	30%	1598,04	41
7	55°	15°	50	30%	1483,05	37,5
8	45°	15°	50	30%	1450,15	32,3
9	55°	0°	-50	60%	2160,48	55,3
10	45°	0°	-50	60%	1978,4	38,7
11	55°	15°	-50	60%	1905,83	42
12	45°	15°	-50	60%	1726,28	32,8
13	55°	0°	50	60%	2034,79	62
14	45°	0°	50	60%	1735,39	59,5
15	55°	15°	50	60%	1814,29	45,5
16	45°	15°	50	60%	1463,9	39

Источник: собственные данные авторов / Source: author's own data

С использованием средних значений для каждого из критериев эффективности Y<sub>1</sub> и Y<sub>2</sub> процесса образования микроповышения был проведен регрессионный анализ полученных данных и составлены линейные регрессионные модели [15-17].

Для дополнительной проверки значимости полученных уравнений регрессии при уровне достоверности вычислений в 95 % построена диаграмма Парето, упорядочивающая рассчитанные значения

t-статистики. Вертикальной линией на графике отмечена значимость 0,05.

Для проверки соответствия остатков модели нормальному распределению путем визуальной оценки характера разброса данных с использованием программных средств математической статистики построена гистограмма остатков для каждой из зависимых переменных Y<sub>1</sub> и Y<sub>2</sub>.

Для оптимизации значений задействованных в эксперименте конструктивных параметров лесного

плуга и влажности обрабатываемой почвы используется функция желательности Харрингтона *d*. Данный метод применяется в экономических, технических, экологических, социальных и других многокритериальных задачах для оценки и поиска оптимальных параметров исследуемых процессов [17, 18].

Для этого с использованием автоматизированной системы статистических расчетов натуральные значения зависимых переменных  $Y_1$  и  $Y_2$  переведены в безразмерную шкалу желательности. Здесь значение «0» – абсолютно неприемлемая величина выходного критерия, значение «1» – наиболее предпочтительный уровень выходного критерия рассматриваемого процесса. В результате функция желательности отражает зависимость оценочных показателей желательности от натуральных размерных величин (например, полученных экспериментальным путем), переведенных в безразмерные показатели.

Стандартизация значений желательности для всех оптимизируемых выходных параметров осуществляется с использованием специально разработанной шкалы желательности.

**Результаты**

Коэффициенты уравнения регрессии влияния параметров конструкции лесного плуга и влажности обрабатываемой почвы на тяговое сопротивление орудия  $R_n$  (переменная  $Y_1$ ), рассчитанные с использованием программных средств математической статистики, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты уравнения регрессии для расчета тягового сопротивления лесного плуга

Table 3

Coefficients of the regression equation for calculating the draught resistance of a forest plow

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_4$
296,1000	17,7103	-12,3990	12,7300

Источник: собственные данные авторов

Source: author's own data

Коэффициент  $b_3$  в уравнении отсутствует, т.к. первоначально проведенный корреляционный анализ полученных экспериментальных данных показал, что теснота связи между выходным критерием  $Y_1$  и независимой переменной  $X_3$  (расстояние от оси диска до кромки отвала) незначительная.

В кодированной форме уравнение регрессии имеет следующую запись:

$$Y_1 = 296,1 + 17,71X_1 - 12,399X_2 + 12,73X_4. \quad (2)$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии выполнена с использованием t-критерия Стьюдента путем проверки гипотезы о случайной природе оцениваемых показателей.

В табл. 4 приведены результаты расчета t-статистики коэффициентов уравнения регрессии для расчета тягового сопротивления лесного плуга, значимых с 95 % вероятностью ( $t_{табл}=2,13$  для  $df=15$ ).

Таблица 4

Результаты расчета t-статистики Стьюдента для определения значимости уравнения регрессии

Table 4

The results of calculating the Student's t-statistics to determine the significance of the regression equation

Коэффициент Регрессии / Regression coefficient	Расчетные коэффициенты регрессии / Calculated regression coefficients	Стандартная ошибка / The standard error	t-статистика / t-statistics	Коэффициент значим (+) / незначим (-) / The coefficient is significant (+) / insignificant (-)
$b_0$	296,1	391,5049	0,75631	±
$b_1$	17,7103	7,4320	2,38297	+
$b_2$	-12,399	4,9547	-2,50249	+
$b_4$	12,73	2,4773	5,13859	+

Источник: собственные данные авторов / Source: author's own data

Свободный член регрессионной модели  $b_0$  по итогам оценки t-статистики является незначимым и

его можно исключить из уравнения, однако ситуация, когда величина  $b_0$  определяет значение  $Y$  в случае, если все переменные  $X$  в модели равны нулю,

присуща экономическим задачам, поэтому коэффициент  $b_0$  целесообразно оставить в модели

Расчет коэффициентов регрессионной модели влияния параметров конструкции лесного плуга и влажности почвы на высоту образуемого разрабатываемым лесным плугом микроповышения  $h$  (переменная  $Y_2$ ) также выполнен с использованием программных средств математической статистики (табл. 5).

Кодированная форма записи уравнения регрессии имеет следующий вид:

$$Y_2 = -4,706 + 0,786X_1 - 0,831X_2 + 0,596X_3 + 0,308X_4. \quad (3)$$

В табл. 6 приведены результаты расчета t-критерия Стьюдента коэффициентов уравнения регрессии для расчета высоты образуемого микроповышения с 95 % доверительной вероятностью ( $t_{\text{табл}} = 2,13$  для  $df = 15$ ).

Свободный член регрессионной модели  $b_0$  по итогам оценки t-статистики является незначимым, однако, как и для уравнения регрессии расчета тягового сопротивления, он оставлен в модели вследствие особенностей исследуемого процесса.

Таблица 5

Коэффициенты уравнения регрессии для расчета высоты образуемого микроповышения

Table 5

Coefficients of the regression equation for calculating the height of the resulting microhill

$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
-4,706	0,78625	-0,83083	0,59625	0,3079

Источник: собственные данные авторов

Source: author's own data

Таблица 6

Результаты расчета t-статистики Стьюдента для определения значимости уравнения регрессии

Table 6

The results of calculating the Student's t-statistics to determine the significance of the regression equation

Коэффициент Регрессии / Regression coefficient	Расчетные Коэффициенты регрессии / Calculated regression coefficients	Стандартная ошибка / The standard error	t-статистика / t-statistics	Коэффициент значим (+) / незначим (-) / The coefficient is significant (+) / insignificant (-)
$b_0$	-4,706	10,6574	-0,44159	±
$b_1$	0,786	0,2023	3,88633	+
$b_2$	-0,831	0,1349	-6,16005	+
$b_3$	0,596	0,2023	2,94719	+
$b_4$	0,308	0,0674	4,56598	+

Источник: собственные данные авторов

Source: author's own data

Общие результаты проверки адекватности полученных регрессионных моделей расчета тягового сопротивления орудия и высоты образуемого им микроповышения с использованием программного продукта Microsoft Excel представлены в табл. 7.

Общий коэффициент корреляции регрессионной модели расчета тягового сопротивления  $R = 0,881$ , что позволяет сделать вывод о том, что между тяговым сопротивлением и входными параметрами, включенными в модель, существует высокая линейная зависимость. В свою очередь, коэффициент детерминации  $R^2 = 0,776$ , а значит, значение

переменной отклика  $Y_1$  в основном зависит от величины задействованных в эксперименте независимых переменных  $X$ .

Общий коэффициент корреляции регрессионной модели расчета высоты микроповышения  $R = 0,939$ , соответственно, между высотой микроповышения и всеми четырьмя входными параметрами, включенными в модель, существует весьма высокая линейная зависимость. Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,882$ , а значит, значение переменной отклика  $Y_2$  в основном зависит от величины задействованных в эксперименте независимых переменных  $X$ .

Общие статистические результаты выполненного регрессионного анализа

Table 7

General statistical results of the performed regression analysis

	Множ. R / Multiple R	Множ. R <sup>2</sup> / Multiple R <sup>2</sup>	Скоп. R <sup>2</sup> / Adjusted R <sup>2</sup>	SS Модель / SS Model	MS Модель / MS Model	MS Остаток / MS Balance	F	p
Y <sub>1</sub> (тяговое сопротивление / Draught resistance)	0,881	0,776	0,720	847213,3	282404,4	20394,19	13,847	0,000334
Y <sub>2</sub> (высота микроповышения / The height of the microhill)	0,939	0,882	0,839	1352,1	338,0	16,37	20,646	0,000045

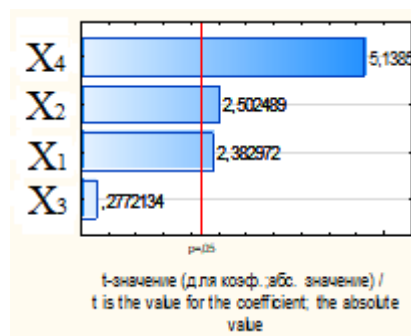
Источник: собственные данные авторов / Source: author's own data

F-критерий Фишера позволяет оценить общую адекватность построенной модели. В случае, если он меньше табличной величины  $F_{табл}$  для установленного уровня значимости, принимается случайный характер оцениваемых параметров. В регрессионной модели расчета тягового сопротивления лесного плуга при уровне значимости 0,05 (95 % вероятность) значение  $F_{табл}$ , равное 3,59, меньше  $F_{факт}$  ( $3,59 < 13,85$ ), поэтому признается статистическая значимость рассматриваемых характеристик рабочего процесса орудия.

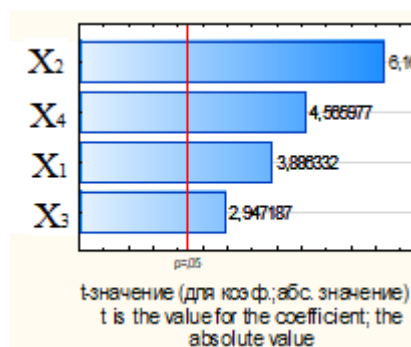
Для регрессионной модели расчета высоты микроповышения также признается статистическая значимость значений высоты образуемого микроповышения с 95 % доверительной вероятностью, так как значение  $F_{табл}$ , равное 3,36, меньше  $F_{факт}$ :  $3,36 < 20,64$ .

P-значение, связанное с заданным уровнем надежности статистических вычислений, для оцениваемых моделей расчета тягового сопротивления и высоты микроповышения равняется 0,00034 и 0,000045 соответственно, что меньше заданного значения 0,05. Это подтверждает, что рассчитанные регрессионные модели статистически значимы и по этому критерию.

Анализ построенной для оценки значимости оцениваемых факторов X диаграммы Парето (рис. 4) подтверждает ранее сделанный вывод о том, что переменная X<sub>3</sub> (расстояние L от оси диска до кромки отвала) в регрессионной модели расчета тягового сопротивления лесного плуга не является значимой, так как значение t-критерия для нее меньше установленного уровня значимости.



a / a



b / b

Рисунок 4. Диаграмма Парето для рассчитанных значений t-статистики регрессионных моделей для расчета тягового сопротивления лесного плуга (a) и высоты образуемого микроповышения (b)  
Figure 4. Pareto diagram for the calculated values of t-statistics of regression models for calculating the draught resistance of a forest plow (a) and the amount of microhill formed (b)

Источник: собственные результаты авторов  
Source: authors' own scheme

Установлено, что графическое представление распределения остатков для каждой из зависимых переменных  $Y_1$  и  $Y_2$  (рис. 5) соответствует нормальному распределению, а значит, подтверждается адекватность полученных линейных регрессионных моделей.

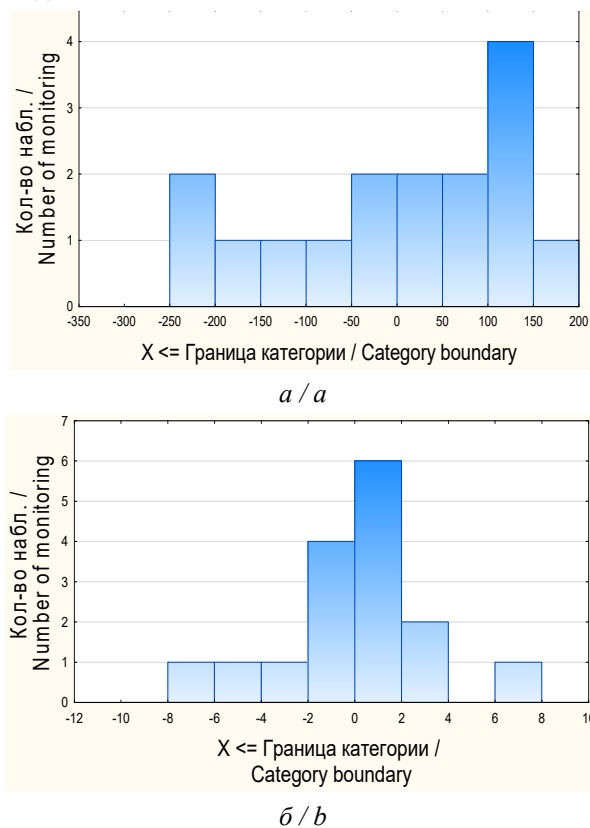


Рисунок 5. Гистограмма исходных остатков для регрессионных моделей расчета тягового сопротивления лесного плуга ( $a$ ) и высоты образуемого микроповышения ( $b$ )  
Источник: собственные результаты авторов

Figure 5. Histogram of the initial residues for regression models for calculating the draught resistance of a forest plow ( $a$ ) and the height of the resulting microhill ( $b$ )

Source: authors' own scheme

Представленные на рис. 6 графики наблюдаемых и предсказанных значений для каждого составленного регрессионного уравнения позволяют оценить качество описания исследуемых процессов разработанными моделями. Кроме того, данные графики позволяют установить наличие выбросов данных.

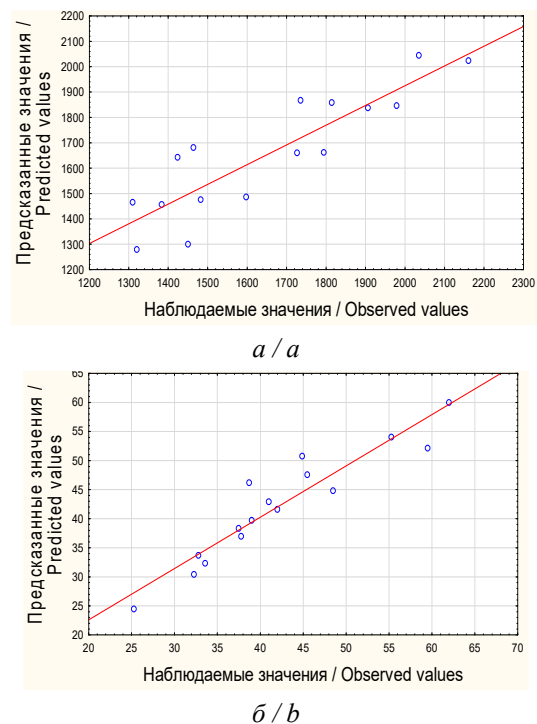


Рисунок 6. Графики наблюдаемых и предсказанных значений для регрессионных моделей расчета тягового сопротивления лесного плуга ( $a$ ) и высоты образуемого микроповышения ( $b$ )

Источник: собственные результаты авторов  
Figure 6. Graphs of observed and predicted values for regression models for calculating the draught resistance of a forest plow ( $a$ ) and the height of the resulting microhill ( $b$ )

Source: authors' own scheme

Для оптимизации значений задействованных в эксперименте конструктивных параметров лесного плуга и влажности обрабатываемой почвы использована функция желательности Харрингтона. Данный метод применяется в экономических, технических, экологических, социальных и других многокритериальных задачах для оценки и поиска оптимальных параметров исследуемых процессов.

Для значений отклика по каждой регрессионной модели были определены уровни желательности достигаемых величин с учетом условий поставленной оптимизационной задачи и данных, полученных в процессе экспериментов: тяговое сопротивление орудия необходимо минимизировать при одновременном получении микроповышения максимальной высоты (табл. 8).

С использованием автоматизированной системы статистических вычислений были построены двумерные поверхности отклика функции желательности вида  $d(X_i, X_j)$ , где  $i$  и  $j$  – порядковые номера входных факторов, задействованных в экспери-

менте) для предсказанных значений зависимых переменных  $Y$ , показывающие взаимосвязь между каждым из входных факторов  $X$ . Возможные комбинации влияния уровней задействованных в экспериментах параметров на величину их желательности представлены на рис. 7.

Таблица 8

Уровни желательности для зависимых переменных  $Y_1$  и  $Y_2$

Table 8

Desirability levels for dependent variables  $Y_1$  and  $Y_2$

Зависимая переменная $Y_1$ – Тяговое сопротивление / Dependent variable $Y_1$ – Draught resistance		
Уровень / Level	Значение, Н / Value, N	Значение по шкале желательности / Value on the desirability scale
Нежелательно / Undesirable	2200	0
Удовлетворительно / Satisfactory	1600	0,5
Наиболее желательно / Most desirable	1100	1
Зависимая переменная $Y_2$ – Высота микроповышения / Dependent variable $Y_2$ – Microhill height		
Уровень / Level	Значение, Н / Value, N	Значение по шкале желательности / Value on the desirability scale
Нежелательно / Undesirable	20	0
Удовлетворительно / Satisfactory	40	0,5
Наиболее желательно / Most desirable	60	1

Источник: собственные данные авторов / Source: author's own data

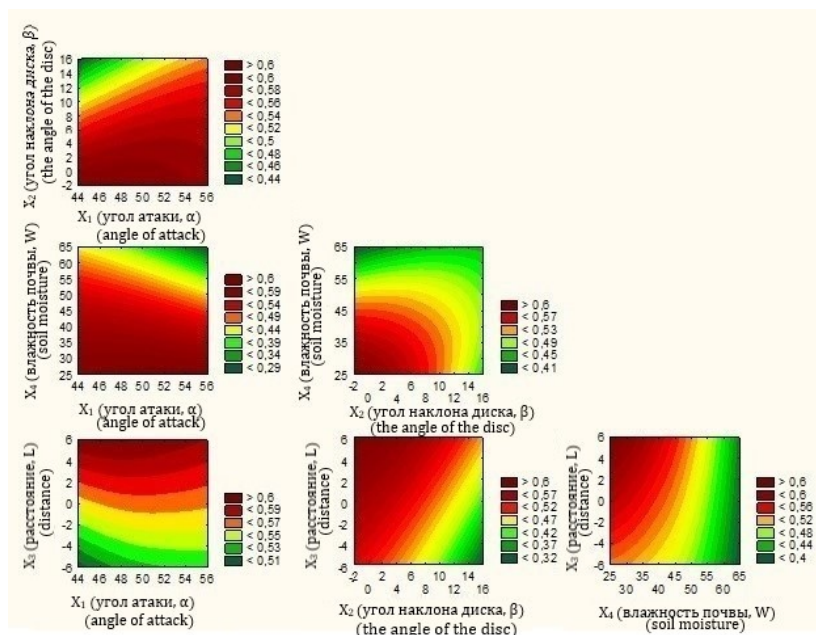


Рисунок 7. Поверхности отклика функции желательности для предсказанных значений зависимых переменных  $Y_1$  и  $Y_2$

Figure 7. Desirability function response surfaces for predicted values of dependent variables  $Y_1$  and  $Y_2$

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

Обсуждение

Применение обобщенной функции желательности Харрингтона позволяет решить поставленную в работе оптимизационную задачу. Данное соответствие отражает зависимость оценочных показателей желательности от натуральных размерных величин (например, полученных экспериментальным путем), переведенных в безразмерные показатели.

Подход, аналогичный используемому в исследовании, был применен в работе [18], где авторами были выявлены частные желательности сравнения тягового сопротивления серийных и экспериментальных рабочих органов культиваторов в зависимости от скорости обработки, а также свойств почвенной среды.

В работах [19] и [20] функция желательности Харрингтона используется для объективного выбора наилучшего ввиду своей объективности вари-

анта применяемой машины для сельскохозяйственных операций из целой группы аналогичных. Данный метод усовершенствован в виде использования обобщенного показателя, учитывающего агрономическую, техническую и экономическую оценку выполняемого технологического процесса.

Аппроксимация полученных уравнений регрессии для построения поверхностей отклика функции желательности выполнена методом наименьших квадратов с использованием автоматизированной системы статистической обработки данных.

Оптимальные параметры входных факторов эксперимента были определены путем совместного наложения благоприятных согласно заданным уровням желательности границ каждой из поверхностей отклика на значения независимых переменных  $X$ .

Диапазоны их изменения были определены на этапе составления матрицы планирования эксперимента (рис. 8).

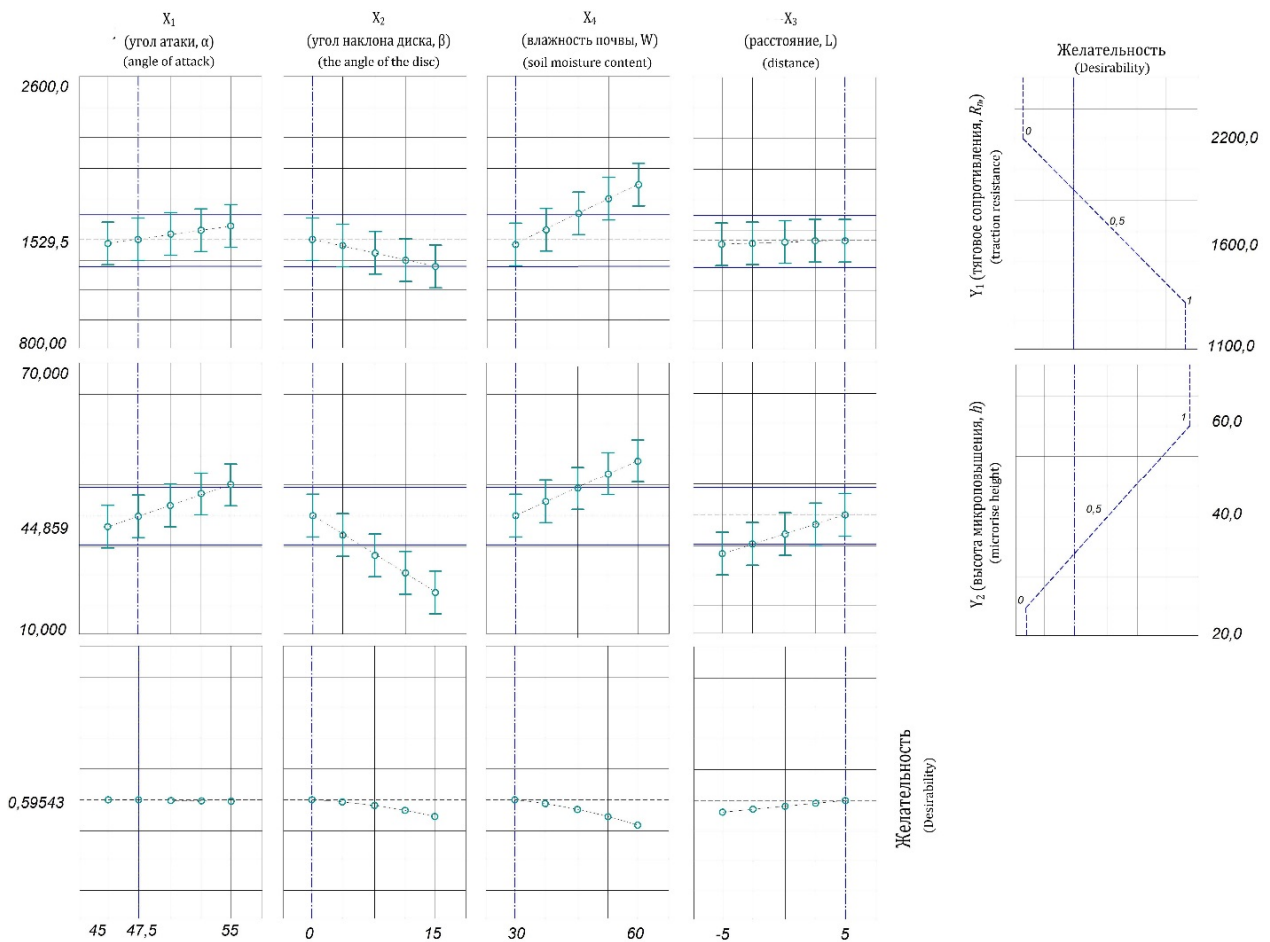


Рисунок 8. Профили желательности входных факторов для предсказанных значений зависимых переменных  $Y$

Figure 8. Desirability profiles of input factors for predicted values of dependent variables  $Y$

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

## Заключение

По результатам оптимизации установлено, что одновременное достижение наименьшего значения тягового сопротивления лесного плуга с комбинированными рабочими органами и наибольшей высоты образуемого в процессе его работы микроповышения возможно при угле атаки  $\alpha$  сферических дисков около  $48^\circ$  (стандартно задаваемое значение при установке дисковых рабочих органов в конструкции плугов –  $45^\circ$ ), угле его установки в вертикальной плоскости  $\beta = 0^\circ$  и расстоянии  $L$  от оси диска до кромки отвала, равном 50 мм.

Влажность почвы в реальных условиях работы лесных почвообрабатывающих орудий является неуправляемым воздействующим фактором. Установленное оптимальное значение влажности – 30 % – необходимо для достижения обозначенного соотношения показателей эффективности ( $R_n \rightarrow \min, h \rightarrow \max$ ). Это подтверждает тот факт, что обработка переувлажненных почв является энергоемким процессом и для агрегатирования плугов, работающих в таких условиях, требуются энергонасыщенные тяговые средства.

## Список литературы

1. Семенов М. А., Комарова О. В. Оценка уязвимости лесного хозяйства лесостепной и степной зон Европейской части России к наиболее вероятным изменениям климата. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2022, 3: 76-85. DOI: <https://10.17308/geo/1609-0683/2022/3/76-85>.
2. Проняева Л. И., Павлова А. В., Федотенкова О. А. Развитие лесного комплекса страны: тенденции и перспективы. Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2020, 10(391): 1834-1856. DOI <https://10.24891/ni.16.10.1834>.
3. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Boreal forest health and global change. Science. 2015; 349(6250): 819-22. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa9092>.
4. Ильинцев А. С., Шамонтьев И. Г., Третьяков С. В. Современная динамика лесопользования в бореальных лесах России (на примере Архангельской области). Лесотехнический журнал. 2021, 3: 45-62. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4>.
5. Wei X., Giles-Hansen K., Spencer S., Ge X., Onuchin A., Li Q., Burenina T., Ilintsev A., Hou Y. Forest harvesting and hydrology in boreal Forests: Under an increased and cumulative disturbance context. Forest Ecology and Management. 2022, 522: 120468. DOI: <https://10.1016/j.foreco.2022.120468>.
6. Дымов А. А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор). Почвоведение. 2017, 7: 787-798. DOI: <https://10.7868/S0032180X17070024>.
7. Казаков В. И., Проказин Н. Е., Лобанова Е. Н. Особенности создания и роста культур ели на вырубках с влажными и временно переувлажненными почвами. Лесотехнический журнал. 2013, 1(9): 32-42. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20164086>.
8. Ramantswana M., Guerra S. P. S., Ersson B. T. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. Current Forestry Reports. 2020, 6 (2): 143–158. DOI: <https://10.1007/s40725-020-00114-7>.
9. Löf M., Dey D., Navarro R., Jacobs D. Mechanical site preparation for forest restoration. New Forests. 2012, 43: 825–848. DOI: <https://10.1007/s11056-012-9332-x>.
10. Uotila K., Rantala J., Saksa T., Hartstela P. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. Silva Fennica. 2010, 44 (3): 511–524. URL: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf443511.pdf>.
11. Дручинин Д. Ю., Попов М. А. К вопросу создания микроповышений при проведении лесовосстановления в условиях временно переувлажняемых почв. Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Вологда, 2021: 48-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47901595>.
12. Дручинин Д. Ю., Камалова Н. С., Попов М. А. Формализованная модель перемещения почвы по поверхностям рабочих органов лесного плуга для образования микроповышений. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 245: 200-214. DOI: <https://10.21266/2079-4304.2023.245.200-214>.



13. Новиков А. И., Новикова Т. П. Априорное ранжирование факторов в моделировании технических систем. Моделирование систем и процессов. 2016, 9-1: 37-40. DOI: <https://10.12737/21625>.
14. Тишанинов Н. П. Особенности решения задач с применением методов интегрирования мнения. Наука в центральной России. 2020, 1(43): 21-27. DOI: <https://10.35887/2305-2538-2020-1-21-27>.
15. Борисова Л. В., Димитров В. П., Зубрилина Е. М. О задаче выбора сельхозмашин на основе многокритериального анализа. От модернизации к опережающему развитию: обеспечение конкурентоспособности и научного лидерства АПК. Екатеринбург, 2022: 23-27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49870568>.
16. Слепенков А. Е., Кулинченко С. Н., Щитов С. В. [и др.]. Регрессионно-дисперсионный анализ экспериментальных данных процесса боронования опытным машинно-тракторным агрегатом. Евразийское Научное Объединение. 2020, 11-2(69): 136-140. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44448045>.
17. Saeed R., Askari M., Jannatkah J. Performance of Tractor and Tillage Implements in Clay Soil. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. 2017, 16: 154–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.003>.
18. Бабицкий Л. Ф., Белов А. В., Дудченко П. С., Шиков Д. К. Использование функции Харрингтона при экспериментальных исследованиях рабочих органов культиваторов. Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2022, 32(195): 172-184. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50252868>.
19. Пичкалев А. В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств. Исследования наукограда. 2012, 1(1): 25-28. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17848548>.
20. Маслов Г. Г., Трубилин Е. И., Цыбулевский В. В., Василенко Н. Б. Функция Харрингтона в исследованиях сельскохозяйственной техники. Таврический вестник аграрной науки. 2022, 3(31): 116-124. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49865414>.

### References

1. Semenov M. A., Komarova O. V. Ocenka uyazvimosti lesnogo hozyajstva lesostepnoj i stepnoj zon Evropejskoj chasti Rossii k naibolee vero-yatnym izmeneniyam klimata. [Assessment of the vulnerability of forestry in the forest-steppe and steppe zones of the European part of Russia to the most likely climate changes]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya = Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology. 2022; 3: 76-85. (In Russ.). DOI: <https://10.17308/geo/1609-0683/2022/3/76-85>
2. Pronyaeva L. I., Pavlova A. V., Fedotenkova O. A. Razvitie lesnogo kompleksa strany: tendencii i perspektivy` [Development of the country's forest complex: trends and prospects]. National interests: priorities and security. 2020; 10(391): 1834-1856. DOI: <https://10.24891/ni.16.10.1834>.
3. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Boreal forest health and global change. Science. 2015; 349(6250): 819-22. DOI: <https://doi:10.1126/science.aaa9092>.
4. Ilyintsev A. S., Shamontyev I. G., Tretyakov S. V. Sovremennaya dinamika lesopol'zovaniya v boreal'ny`x lesax Rossii (na primere Arxangel'skoj oblasti). [Modern dynamics of forest management in boreal forests of Russia (on the example of the Arkhangelsk region)]. Forestry Engineering Journal. 2021; 3: 45-62. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4>.
5. Wei X., Giles-Hansen K., Spencer S., Ge X., Onuchin A., Li Q., Burenina T., Ilintsev A., Hou Y. Forest harvesting and hydrology in boreal Forests: Under an increased and cumulative disturbance context. Forest Ecology and Management. 2022, 522: 120468. DOI: <https://10.1016/j.foreco.2022.120468>.
6. Dymov A. A. Vliyanie sploshny`x rubok v boreal'ny`x lesax Rossii na pochvy` (obzor) [The effect of continuous logging in boreal forests of Russia on soils (review)]. Soil science. 2017; 7: 787-798. (In Russ.) DOI: <https://10.7868/S0032180X17070024>.
7. Kazakov V. I., Prokazin N. E., Lobanova E. N. Osobennosti sozdaniya i rosta kul'tur eli na vy`rubkax s vlazhny`mi i vremenno pereuvlazhnenny`mi pochvami. [Features of the creation and growth of spruce crops in cuttings

with moist and temporarily waterlogged soils]. *Forestry Engineering Journal*. 2013;1(9):32-42. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20164086>.

8. Ramantswana M., Guerra S. P. S., Ersson B. T. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. *Current Forestry Reports*. 2020; 6(2): 143–158. DOI: <https://10.1007/s40725-020-00114-7>.

9. Löf M., Dey D., Navarro R., Jacobs D. Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*. 2012, 43: 825–848. DOI: <https://10.1007/s11056-012-9332-x>.

10. Uotila K., Rantala J., Saksa T., Hartstela P. Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. *Silva Fennica*. 2010; 44(3): 511–524. URL: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf443511.pdf>.

11. Druchinin D. Yu., Popov M. A. K voprosu sozdaniya mikropovy`shenij pri provedenii lesovosstanovleniya v usloviyax vremenno pereuvlazhnyayemy`x pochv [On the issue of creating micro-elevations during reforestation in conditions of temporarily waterlogged soils]. *Actual problems of the development of the forest complex*. Vologda, 2021:48-53. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47901595>.

12. Druchinin D. Yu., Kamalova N. S., Popov M. A. Formalizovannaya model` peremeshheniya pochvy` po poverxnostyam rabochix organov lesnogo pluga dlya obrazovaniya mikropovy`shenij [A formalized model of soil movement on the surfaces of the working parts of a forest plow for the formation of microhills]. *Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy*. 2023; 245: 200-214. (In Russ.). DOI: <https://10.21266/2079-4304.2023.245.200-214>.

13. Novikov A. I., Novikova T. P. Apriornoe ranzhirovanie faktorov v modelirovanii tekhnicheskix system. [A priori ranking of factors in the modeling of technical systems]. *Modeling of systems and processes*. 2016; 9-1: 37-40. (In Russ.). DOI: <https://10.12737/21625>.

14. Tishaninov N. P. Osobennosti resheniya zadach s primeneniem metodov integrirovaniya mneniya [Features of solving problems using methods of integrating opinions]. *Science in central Russia*. 2020; 1(43): 21-27. (In Russ.). DOI: <https://10.35887/2305-2538-2020-1-21-27>.

15. Borisova L. V., Dimitrov V. P., Zubrilina E. M. O zadache vy`bora sel`hozmashin na osnove mnogokriterial`nogo analiza. [On the task of selecting agricultural machinery based on a multi-criteria analysis]. *From modernization to advanced development: ensuring the competitiveness and scientific leadership of the agro-industrial complex*. Yekaterinburg, 2022: 23-27. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49870568>.

16. Slepnev A. E., Kulinchenko S. N., Shchitov S. V. [et al.]. Regressionno-dispersionny`j analiz e`ksperimental`ny`x danny`x processa boronovaniya opy`tny`m mashinno-traktorny`m agregatom. [Regression and dispersion analysis of experimental data of the harrowing process by an experimental machine-tractor unit]. *Eurasian Scientific Association*. 2020; 11-2(69): 136-140. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44448045>.

17. Saeed R., Askari M., Jannatkhah J. ‘Performance of Tractor and Tillage Implements in Clay Soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2017; 16: 154–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.05.003>.

18. Babitsky L. F., Belov A. V., Dudchenko P. S., Shishkov D. K. Ispol`zovanie funkcii Xarringtona pri e`ksperimental`ny`x issledovaniyax rabochix organov kul`tivatorov. [The use of the Harrington function in experimental studies of the working organs of cultivators]. *Proceedings of the agricultural science of Taurida*. 2022; 32(195): 172-184. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50252868>.

19. Pichkalev A. V. Obobshhennaya funkciya zhelatel`nosti Xarringtona dlya sravnitel`nogo analiza tekhnicheskix sredstv [Generalized Harrington desirability function for comparative analysis of technical means]. *Research of the science city*. 2012;1(1):25-28. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17848548>.

20. Maslov G. G., Trubilin E. I., Tsybulevsky V. V., Vasilenko N. B. Funkciya Xarringtona v issledovaniyax sel`skozhoyajstvennoj tekhniki [The Harrington function in agricultural machinery research]. *Tauride Bulletin of Agrarian Science*. 2022; 3(31): 116-124. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49865414>.

### Сведения об авторах

✉ *Дручинин Денис Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: [druchinin.denis@rambler.ru](mailto:druchinin.denis@rambler.ru).

*Попов Максим Александрович* – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-6356-5028>, e-mail: [popovmaxim98@mail.ru](mailto:popovmaxim98@mail.ru).

*Зимарин Сергей Викторович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6822-624X>, e-mail: [sezimarin@yandex.ru](mailto:sezimarin@yandex.ru).

*Третьяков Александр Иванович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-5834-1010>, e-mail: [tretyakov-ai@mail.ru](mailto:tretyakov-ai@mail.ru).

### Information about the authors

✉ *Denis Yu. Druchinin* – Cand. Sci. (Technical), Docent, Head of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: [druchinin.denis@rambler.ru](mailto:druchinin.denis@rambler.ru).

*Maksim A. Popov* – Postgraduate student (Tech.), Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6356-5028>, e-mail: [popovmaxim98@mail.ru](mailto:popovmaxim98@mail.ru).

*Sergei V. Zimarin* – Cand. Sci. (Technical), Docent, Associate professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6822-624X>, e-mail: [sezimarin@yandex.ru](mailto:sezimarin@yandex.ru).

*Alexander I. Tretyakov* – Cand. Sci. (Technical), Associate professor of the Chair of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5834-1010>, e-mail: [tretyakov-ai@mail.ru](mailto:tretyakov-ai@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Научный обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/12>

УДК 630\*32:65.014.011.56



## Автоматизированное оперативное управление лесосечными работами: методологический анализ

Анатолий Н. Заикин<sup>1</sup>, [zaikin.anatolij@yandex.ru](mailto:zaikin.anatolij@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

Владимир В. Сиваков<sup>1</sup>, [sv@bgitu.ru](mailto:sv@bgitu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Владимир А. Зеликов<sup>2</sup>, [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Алексей С. Чуйков<sup>3</sup>, [offlex88@belstu.by](mailto:offlex88@belstu.by) <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

Артур И. Новиков<sup>2</sup>, [arthur.novikov@vglta.vrn.ru](mailto:arthur.novikov@vglta.vrn.ru) <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Владимир В. Стасюк<sup>2</sup>✉, [stasiuk.volodya@yandex.ru](mailto:stasiuk.volodya@yandex.ru) 0000-0002-8689-955X

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

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

<sup>3</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

Лесосечные работы выполняются различными типами машин и механизмов, которые обычно объединяются в комплекты. Состав комплекта зависит от технологической схемы, по которой организуются работы непосредственно на каждой делянке в зависимости от климатических, ландшафтных и других факторов. Повышение производительности комплекта машин связано с эффективностью работы машин и механизмов на отдельных операциях, но в значительной степени зависит и от правильности подбора машин в составе комплекта, их количества, производственных возможностей, конструктивных особенностей в зависимости от различных условий на каждой площадке. Важно в процессе планирования и управления лесосечными работами, учитывать согласованность работы лесных машин в комплекте, что предполагает определение оптимальных режимов работы каждой машины, количество определенных групп машин, производительности машин, времени их работы и т.д. По исследованиям, ученых различных научных организаций на предприятиях лесного комплекса, был сформирован список задач, для решения которых создаются автоматизированные системы оперативного планирования лесосечными работами (АОП ЛР). На основании АОП ЛР организовывается автоматизированное оперативное управления лесозаготовительными работами (АОУ ЛР). В состав комплекса первоочередных задач АОУ ЛР входят следующие группы задач: учета объемов выполненных работ на операциях лесосечных работ; анализ выполнения плановых заданий на лесосеке, определенных при решении задач оперативного планирования; выработка управляющих воздействий на процесс лесосечных работ; составления отчетных документов. Первоочередной состав задач оперативного управления логически следует из состава задач планирования. Положительным следствием данной взаимосвязи является общность информационной базы обоих комплексов задач, что значительно упрощает их эксплуатацию, как единого целого в качестве математического обеспечения автоматизированной системы управления лесосечными работами.

**Ключевые слова:** лесосека, лесосечные работы, комплекты машин, комплекс задач, автоматизированная система оперативного планирования, автоматизированное оперативное управление, лесозаготовительные работы программное обеспечение, лесной комплекс, лесовосстановительные работы, лесозаготовки, информационное пространство.

**Финансирование:** исследование не получало внешнее финансирование.

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

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

**Для цитирования:** Автоматизированное оперативное управление лесосечными работами: методологический анализ / А. Н. Заикин, В. В. Сиваков, В. А. Зеликов, А. С. Чуйков, А. И. Новиков, В. В. Стасюк // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 204–226. – Библиогр.: с. 215–225 (84 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/12>.

**Поступила** 16.05.2024. **Пересмотрена** 05.06.2024. **Принята** 06.06.2024. **Опубликована онлайн** 17.06.2024.

*Review*

## Automatized management of logging operations: a methodological analysis

Anatolii N. Zaikin<sup>1</sup>, [zaikin.anatolij@yandex.ru](mailto:zaikin.anatolij@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

Vladimir V. Sivakov<sup>1</sup>, [sv@bgitu.ru](mailto:sv@bgitu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Vladimir A. Zelikov<sup>2</sup>, [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Alexey S. Chuikov<sup>3</sup>, [offlex88@belstu.by](mailto:offlex88@belstu.by), <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

Arthur I. Novikov<sup>2</sup>, [arthur.novikov@vglta.vrn.ru](mailto:arthur.novikov@vglta.vrn.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Vladimir V. Stasyuk<sup>2</sup>, [stasiuk.volodya@yandex.ru](mailto:stasiuk.volodya@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8689-955X>

<sup>1</sup>*Bryansk State Engineering and Technological University, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev street, Voronezh, 394087, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Belarussian State Technological University, 13a Sverdlov str., Minsk, 220006, Belarus*

### Abstract

Logging operations are performed by various types of machines and mechanisms, which are usually combined into sets. The composition of the kit depends on the technological scheme according to which work is organized directly on each plot, depending on climatic, landscape and other factors. Increasing the productivity of a set of machines is associated with the efficiency of machines and mechanisms in individual operations, but it also largely depends on the correct selection of machines in the set, their number, production capabilities, design features depending on the different conditions at each site. It is important in the process of planning and managing logging operations to take into account the consistency of the operation of the complete forest machines, which involves determining the optimal operating modes of each machine, the number of certain groups of machines, the productivity of machines, their operating time, etc. According to research conducted by scientists of various scientific organizations at enterprises of the forestry complex, a list of tasks was formed, for which automated systems of operational planning of logging operations (AOP LR) are being created. Automated operational management of logging operations (AOU LR) is organized on the basis of AOP LR. The complex of priority tasks of the AOU LR includes knowledgeable groups of tasks; accounting for the volumes of work performed on logging operations; analysis of the fulfilment of planned tasks on the logging site, determined when solving operational planning tasks; development of control actions on the process of logging operations; preparation of accounting documents. The primary composition of operational management tasks logically follows from the composition of planning tasks. A positive consequence of this relationship is the commonality of the information base of both sets of tasks,

which greatly simplifies their operation as a single whole as a mathematical support for an automated logging management system.

**Keywords:** *logging area, logging operations, sets of machines, a set of tasks, automated operational planning system, automated operational management, logging operations software, forest complex, reforestation, logging, information space.*

**Funding:** The study did not receive external funding.

**Acknowledgements:** The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

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

**For citation:** Zaikin A. N., Sivakov V. V., Zelikov V. A., Chuikov A. S, Novikov A. I., Stasyuk V. V. (2024). Automatized management of logging operations: a methodological analysis. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 204-226 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/12>.

*Received* 16.05.2024. *Revised* 05.06.2024. *Accepted* 06.06.2024. *Published online* 17.06.2024.

### Введение

Объектом управления на лесосечных работах являются производственные операции – валка, трелевка, обрезка сучьев, погрузка, выполняемые производственными подразделениями и бригадами с использованием машин различного типа, а также оперативные запасы между этими операциями.

Возможность реализации производительности лесозаготовительных машин, заложенной производителем, зависит от технологических процессов лесосечных работ, ландшафтных условий, климатических условий и многих других случайных факторов, все эти факторы сложно прогнозировать и учесть при проектировании лесосечных работ.

Статистический анализ работы лесозаготовительных машин, показывает, что их производительность не только не стремится к какой-либо единой величине, но и наоборот, значительно отдалается друг от друга. Например, трелевочные машины по производительности до трех раз отстают от валочных машин, а от машин по обрезке сучьев примерно в два раза. Поэтому крайне сложно подобрать количество лесных машин разного профиля, чтобы производительность при выполнении каждой операции лесосечных работ приблизительно совпадала. Сменная производительность всего комплекса будет равна наименьшей производительности машины на одной из операций. Как следствие машины с более

высокой производительностью будут частично простаивать. Кроме того, объемы выработки машин с течением времени изменяются, а не остаются постоянными [1, 2, 3].

Колебание объемов выработки лесозаготовительных машин на смежных операциях и практическую невозможность выравнивания их производительности вызывает необходимость иметь запас деревьев между валкой и трелевкой; трелевкой и обрезкой сучьев; а также запас хлыстов между обрезкой сучьев и погрузкой-вывозкой [1, 4, 5].

Проведенные авторами наблюдения [5, 6, 7], а также другими коллективами авторов [1, 3, 8, 9, 10] показали, что объемы запасов должны быть заранее определены для каждой лесосеки в отдельности, создаваться, пополняться, потребляться и вырабатываться по предварительно рассчитанным режимам работы машин. Иначе, или производительность валочных (валочно-пакетирующих) машин окажется значительно выше требуемой, что грозит затовариванием площадей значительным объемом сваленных деревьев, или наоборот, трелевочные машины начнут простаивать из-за нехватки, также будут простаивать сучкорезные машины, погрузчики.

Известными (традиционными) методами рассчитать все необходимые данные для согласованного выполнения лесосечных работ сложно и трудно.

Задача решается значительно проще и легче с применением автоматизированного оперативного планирования и управления.

Информационные технологии [76] в настоящее время стали активно проникать во все сферы производственной деятельности человека – образование [11], промышленность [12, 13, 14], транспорт [15], проектирование [16, 17, 18, 19] и производство [20, 21], охрану труда [22]. Основой используемых цифровых технологий является широкое применение интернета вещей [23], интеллектуальных навигационных алгоритмов [70, 71], а также цифровых двойников изделий и процессов [24- 26].

При выборе лесных [82] машин (харвестеров, форвардеров, погрузчиков, сортиментовозов) входящих в комплекс для обеспечения необходимой производительности лесозаготовительного процесса [27-29] и возможностей дальнейшего лесовосстановления [72, 74] следует учитывать как технические и энергетические [73] характеристики машин, их ЭКБ [68, 69, 80], так и их способность адаптироваться в общее цифровое пространство [79, 81] предприятия, эффективно осуществлять планирование работ [30-31].

Лесозаготовительные машины – это сложная техника, а любая техника требует сервисного обслуживания и ремонта, поэтому при планировании лесозаготовительных работ является важным, чтобы техника была в исправном состоянии. Для управления сервисным обслуживанием машин на предприятиях, наряду с планово-предупредительной системой технического обслуживания и ремонта находят применение и другие системы, такие как планово-диагностический ремонт (плановое периодическое обслуживание с контролем технического состояния машин [32, 33], ремонт по фактическому состоянию [34, 35, 75], сервис [84], ориентированный на надежность [36], предотвращение рисков [37]. Применение такого рода систем основано на использовании удаленного контроля технического состояния узлов и агрегатов машины [38-39].

Цель исследования – сравнить авторскую методику с существующими методиками автоматизированного оперативного управления лесосечными

работами для повышения эффективности работы лесозаготовительных машин на основе цифровизации оперативного управления данными о работе машин.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследования*

Объектом исследования являются машины и оборудование лесосечных работ.

Предмет исследования - алгоритм взаимодействия лесосечных машин в процессе эксплуатации.

#### *Сбор данных*

Использовали систематический поиск, который проводили по базам данных ELibrary.ru и ресурсам сети Интернет по следующему алгоритму запроса: первоочередные задачи оперативного управления лесосечными работами. Проведенный анализ дал возможность определить круг задач оперативного управления лесосечными работами на основе исследований, проведенных научными группами кафедр Московского государственного технического университета, Брянского государственного инженерно-технологического университета, Воронежского государственного лесотехнического университета и др. вузов на предприятиях лесного комплекса. Определен комплекс задач, разработка и внедрение которого составляет первый этап создания автоматизированной системы оперативного управления лесосечными работами.

#### *Описание авторской методики автоматизированного оперативного управления работой лесозаготовительных машин*

Целью автоматизированного оперативного управления лесозаготовительными работами (АОУ ЛР) является своевременное определение и реализация эффективных управляющих воздействий на производственные операции, распределение работ [66, 78] и трудовых ресурсов [67, 77], обеспечивающих выполнение плановых объемов с наименьшими затратами [40].

Методика включает следующие шаги:

- перечень задач оперативного управления работой лесосечных машин;
- состав комплекса технических средств для автоматизированного оперативного управления работой лесосечных машин;
- принципиальная схема оперативного управления работой лесосечных машин;

## Технологии. Машины и оборудование

- последовательность и функциональная схема автоматизированного решения задач оперативного управления работой лесосечных машин.

В состав комплекса первоочередных задач АОУ ЛР (табл. 1) входят следующие группы задач:

УЛ-1. Учет объемов выполненных работ на операциях лесосечных работ; задачи учета расходов материальных ресурсов на лесосечных операциях. Назначением задач этой группы является формирование входной информации для решения остальных задач комплекса.

УЛ-2. Анализ выполнения плановых заданий на лесосеке, определенных при решении задач оперативного планирования. Результатами решения данных задач являются показатели степени отклоне-

ния фактических значений параметров функционирования объекта управления от соответствующих им расчетных значений.

УЛ-3. Выработка управляющих воздействий на процесс лесосечных работ. Если наблюдаемые отклонения параметров управляемого процесса превышают заданную норму, решение задач этой группы позволяет определить вид и оптимальную размерность результирующего воздействия на те или иные операции процессов лесосечных работ с целью выравнивания показателей выработки и, в конечном итоге, выполнения плановых заданий.

УЛ-4. Составления отчетных документов. В их состав будут входить оперативные данные по ходу лесосечных работ для составления отчетов и сравнения их с принятыми планами.

Таблица 1

Состав задач оперативного управления лесосечными работами

Table 1

The composition of the tasks of operational management of logging operations

Индекс задачи Task index	Назначение задачи Task assignment	Состав входных данных The composition of the input data	Состав выходных данных The composition of the output data	Тип устройства Device Type
УЛ-1	Учет объема выполненных работ и расхода ресурсов Accounting for the amount of work performed and resource consumption			
УЛ-1.1	на валке леса on the felling of the forest	Параметры деревьев и хлыстов, расход ресурсов Parameters of trees and whips, resource consumption	Общий объем обработанной древесины за смену, наличие ресурсов Total volume of processed wood per shift, availability of resources	Измерительные устройства лесозаготовительных машин Measuring devices of logging machines
УЛ-1.2	на трелевке леса on the skidding of the forest			
УЛ-1.3	на обрезке сучьев on pruning branches			
УЛ-2	Обработка и анализ данных по объемам выполненных работ, расходу ресурсов и состоянию машин Processing and analysis of data on the volume of work performed, resource consumption and machine condition	Данные об объемах выполненных работ, израсходованных ресурсах по операциям и состоянию машин Data on the amount of work performed, resources spent on operations and the condition of machines	Суммарные данные об объемах работ, ресурсах запасах по бригадам, мастерским участкам за смену и состоянии машин Summary data on the volume of work, inventory resources by teams, workshop sites per shift and the condition of the machines	Персональные ЭВМ Personal computers



Индекс задачи Task index	Назначение задачи Task assignment	Состав входных данных The composition of the input data	Состав выходных данных The composition of the output data	Тип устройства Device Type
УЛ-3	Выработка управляющих воздействий на производственный процесс Development of control actions on the production process	Текущие данные по объемам работ, режимам работы машин, запасам древесины, ресурсам по машинам, бригадам, участкам Current data on the volume of work, modes of operation of machines, wood reserves, resources by machines, crews, sites	О времени простоя маши, производственно-экономические показатели, вид управляющих воздействий About machine downtime, production and economic indicators, type control actions	Персональные ЭВМ Personal computers
УЛ-4	Формирование, передача отчетной информации или печать отчетных документов Formation, transmission of accounting information or printing of accounting documents	То же Too	Оперативная сводка о выполнении плана – расход и наличие ресурсов Operational summary on the implementation of the plan – expenditure and availability of resources	Персональные ЭВМ Personal computers

Источник: собственные данные авторов  
Source: authors' own data

Поскольку возможно контролировать лишь показатели, фигурирующие в качестве результатов решения задач АОП ЛР, первоочередной состав задач оперативного управления логически следует из состава задач планирования. Положительным следствием данной взаимосвязи является общность информационной базы обоих комплексов задач, что значительно упрощает их эксплуатацию, как единого целого в качестве математического обеспечения автоматизированной системы управления лесосечными работами.

Автоматизацию оперативного управления планируется осуществлять без увеличения или даже с уменьшением штатов управленческого персонала на лесосечных работах, только путем автоматизации операций учета, обработки и анализа данных учета и выработки на их основе соответствующих управленческих решений.

Вполне очевидно, что это возможно лишь при оснащении производства техническими средствами связи и учета.

Схему оперативного управления лесосечными работами в общем виде можно представить себе следующим образом. Установленные на лесозаготовительных машинах (валочных, трелевочных, сучкорезных и д.р.) специальные устройства индивидуального учета выполненных работ передают с помощью встроенных в конструкцию машины изготовителем или устанавливаемого дополнительно телематического оборудования информацию на сервер компании, а затем владельцу техники (рис. 1).

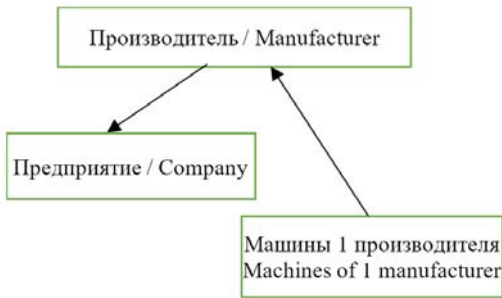


Рисунок 1. Схема работы с информацией, получаемой от машин, производителю, имеющему собственное аналитическое ПО

Источник: Собственная схема авторов

Figure 1. A scheme for working with information received from machines to a manufacturer with its own analytical software

Source: Authors' own scheme

Такой вариант работы используется компаниями Komatsu и John Deere, пользователи с помощью программ MaxiXplorer и TimberLink (рис. 2) имеют возможность получения информации о состоянии машины, ее производительности.

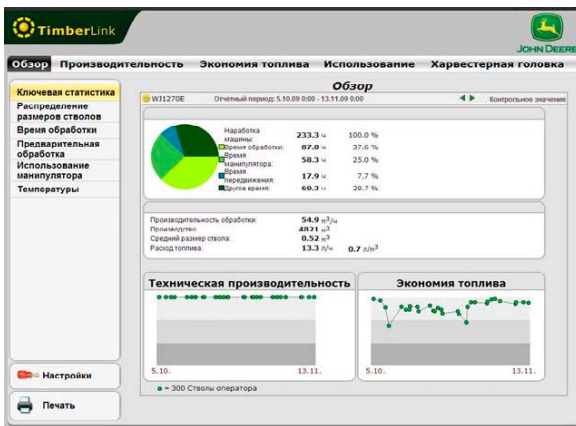


Рисунок 2. Пример интерфейса системы управления TimberLink

Источник: Система удаленного мониторинга техники JDLink. URL: <https://tmbk.ru/media/k2/attachments/Буклет%20Система%20удаленного%20мониторинга%20техники%20JDLink.pdf> (дата обращения: 20.02.2024)

Figure 2. An example of the TimberLink management system

Source: <https://tmbk.ru/media/k2/attachments/Буклет%20Система%20удаленного%20мониторинга%20техники%20JDLink.pdf> (20.02.2024)

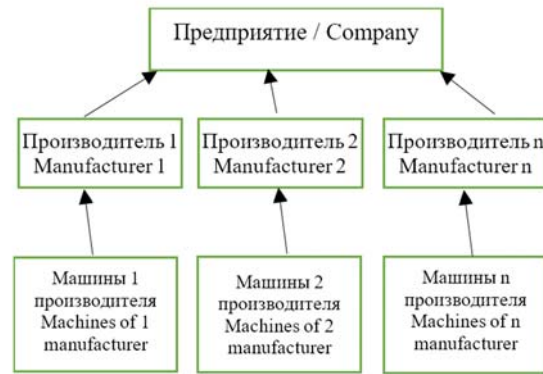


Рисунок 3. Схема работы с информацией, получаемой от машин, разных производителей, имеющих собственное аналитическое ПО

Источник: Собственная схема авторов

Figure 3. The scheme of working with information received from machines from different manufacturers that have their own analytical software

Source: Authors' own scheme

В случае использования на предприятии машин нескольких производителей, владелец сталкивается с необходимостью использования специализированного программного обеспечения каждого производителя, что создает дополнительные сложности при анализе деятельности всего парка машин (разных производителей) (рис. 3).

Выходом из создавшейся ситуации может стать такой вариант работы, когда информация с машин разных производителей поступает не на сервер соответствующего производителя, а в используемую предприятием ERP систему (рис. 4). Такой принцип работы применяется компанией Ponsse, используя для этого технологию API (рис. 5). Устанавливаемые при этом комплекты оборудования на рабочие машины позволяют получать данные со всех машин (такое решение уже применяется в сельском хозяйстве) [41].

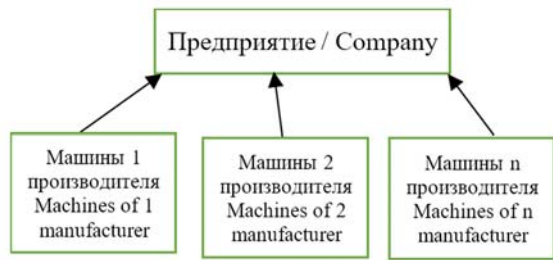


Рисунок 4. Схема работы с информацией, получаемой от машин, разных производителей, в ERP систему владельца

Источник: Собственная схема авторов

Figure 4. The scheme of working with information received from machines from different manufacturers into the ERP system of the owner

Source: Authors' own scheme

Применение технологий контроля режимов работы и технического состояния лесозаготовительной техники повысит эффективность планирования и управления посредством комплексного мониторинга транспорта, минимизирует затраты на заготовку и вывозку древесины. Так, по данным компании Omnicomm оборудование контроля топлива дает до 30 % экономии ГСМ, обеспечивает безопасность технологических процессов и улучшает выработку техники на 30-35 % за счет оснащения автопарка бортовыми устройствами ГЛОНАСС / GPS, собирающими и передающими в платформу мониторинга большое количество параметров состояния и движения, а также события в реальном времени. При работе машин вне зоны покрытия сотовой сети, данные можно загружать в облако через специально предусмотренную систему Omnicomm PORT (Системы мониторинга для лесозаготовительной техники) (рис. 6).

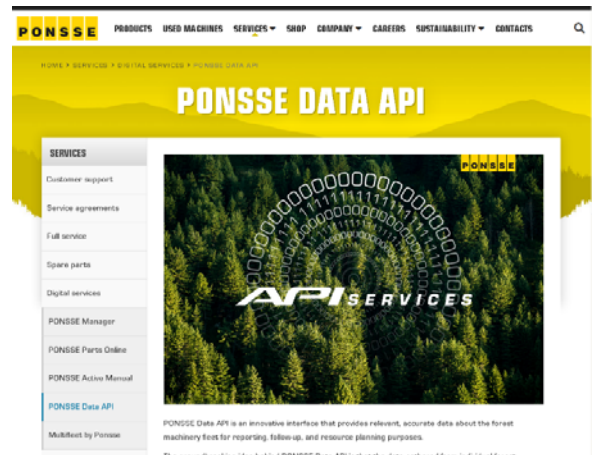


Рисунок 5. Веб-страница ресурса

Источник: <https://www.ponsse.com/en/ponsse-data-api/#/>

Figure 4. The web page of the resource

Source: <https://www.ponsse.com/en/ponsse-data-api/#/>

Как показывают работы ряда авторов [42, 43, 44], применение новых технологий, например, датчиков, отслеживающих состояние отдельных деревьев, позволяет повысить эффективность использования харвестеров на лесозаготовках.

Имеющаяся информация о состоянии древесины на каждом этапе – от заготовки до транспортировки позволяет эффективно распоряжаться имеющимися ресурсами [45, 46, 47].

Необходимо учитывать, что достаточно низкий уровень прохождения сигналов в лесу [48] создает проблемы в плане оперативной передачи информации с работающих машин на сервер предприятия, поэтому возникает необходимость в использовании дополнительных средств ретрансляции сигнала [49, 50].

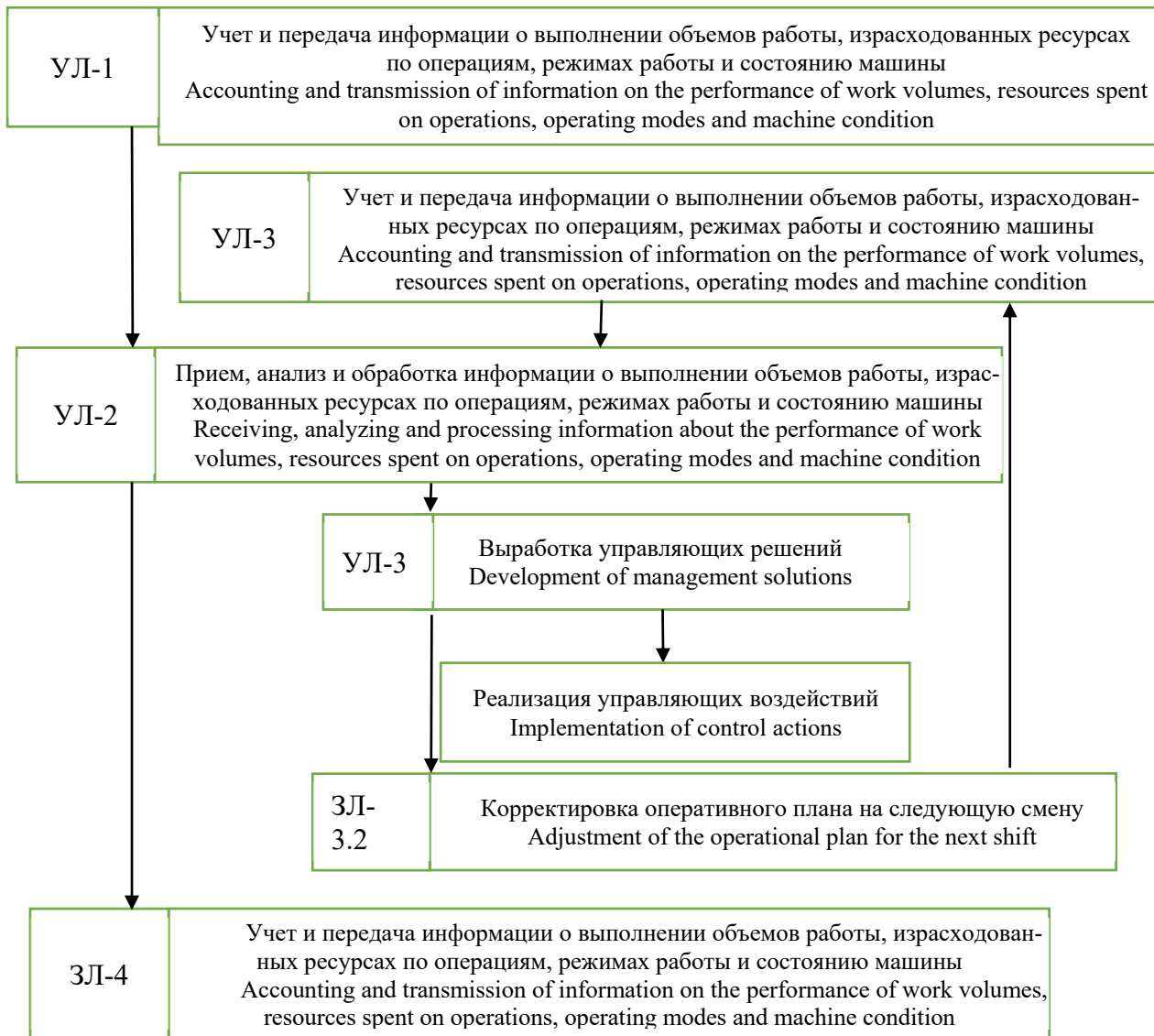


Рисунок 6. Последовательность и функциональная схема автоматизированного решения задач оперативного управления лесосечными работами израсходованных ресурсах по операциям, режимах работы и состоянию машин

Источник: Собственная схема авторов

Figure 6. The sequence and functional scheme of the automated solution of tasks of operational management of logging operations of spent resources on operations, modes of operation and condition of machines

Source: Authors' own scheme

Передаваемая информация о количестве древесины, поступающей от валки к трелевке, от трелевки к обрезке сучьев и от обрезки сучьев к погрузке, режимах работы машин, израсходованных ресурсах по операциям и состоянию машин, должна накапливаться на сервере и выводиться при необходимости на компьютер или смартфон. Все это позволяет руководителю в любой момент времени

иметь информацию о ходе лесосечных работ по объему сваленных деревьев, объему стрелованных деревьев, объему деревьев, очищенных от сучьев, объему запасов между операциями, режимах работы машин, израсходованных ресурсах по операциям и состоянию машин. Анализ полученных данных даст возможность определить наличие отклонений в выполнении плана разработки лесосеки.

Задача УЛ-3 может также решаться в автоматическом режиме. Смыслом этой задачи является определение вида управляющего воздействия при отклонении хода выполнения операций лесосечных работ от планового. Такими управляющими воздействиями могут быть подключение и вывод резервных машин, вывод из работы основных машин, доставка горючих и других материалов, проведение технического обслуживания и ремонта и т.д. Эффективная работа парка машин в этом случае будет зависеть от создания единой цифровой среды [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57].

### Анализ данных

С целью определения места авторской методики в ряду имеющихся методик автоматизированного управления сформировали пять критериев применимости (или эффективности):

Критерий 1 – Направленность (ориентация на область использования)

Критерий 2 - Тип применяемой модели (основанность решения задачи)

Критерий 3 - Встраиваемость (Возможность встраивания в имеющееся ПО)

Критерий 4 - Возможность учета технического состояния машин

Критерий 5 - Возможность использования машин разных производителей

Статистическую обработку данных для оценки *степень сходства и различия* известных и авторской методики проводили с помощью специализированного программного обеспечения *SPSS Statistics v25* по аналогии с ранее проведенными исследованиями [3].

Визуализацию сравнения критериев, согласно А.Н. Заикину и др. (2023) [3], проводили кластерной [83] «*диаграммой (рис. 7), по оси абсцисс которой откладывали меру Жаккара (Jaccard) для бинарных данных, вычисленную по методу межгрупповой связи, а по оси ординат – критерии оценки 3-5 [3]*».

### Результаты

Результаты сравнения имеющихся методик с учетом предложенных нами критериев приведены в таблице 2. Таблица выполнено на основании анализа научных разработок, результаты которых представлены списком литературы.

Кластерная диаграмм, построенная на основании табл. 2, отображена на рис. 7.

Таблица 2

Сравнение методик автоматизированного управления работой лесосечных машин

Table 2

Comparison of methods of automated control of cutting machines

Методика Methodology	Критерий 1 Criterion 1	Критерий 2 Criterion 2	Критерий 3 Criterion 3	Критерий 4 Criterion 4	Критерий 5 Criterion 5
1 методика (авторская) methodology (author's)	Максимальный объем выработки комплекта машин при минимуме затрат  The maximum volume of production of a set of machines at a minimum cost	Математическое и имитационное моделирование  Mathematical and simulation modeling	Имеется  is available	Планируется предусмотреть  It is planned to provide	Возможно  Possible
2 методика [2] methodology [2]	Минимальная себестоимость вывозки леса  Minimum cost of timber removal	алгоритмы Басакера — Гоуэна и Форда — Беллмана  algorithms	Не предусмотрено  Not provided	Не имеется  Not available	Возможно  Possible

Методика Methodology	Критерий 1 Criterion 1	Критерий 2 Criterion 2	Критерий 3 Criterion 3	Критерий 4 Criterion 4	Критерий 5 Criterion 5
		Basaker—Gowan and Ford—Bellman			
3 методика [64] Джон Дир Methodology [64] John Deere	Максимальный объем выработки машин Maximum output of machines	Анализ статистических данных Analysis of statistical data	Имеется is available	Имеется is available	Нет No
4 методика [59] methodology [59]	Максимальный объем выработки машин Maximum output of machines	Системный анализ System analysis	Имеется is available	Не имеется Not available	Возможно Possible

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

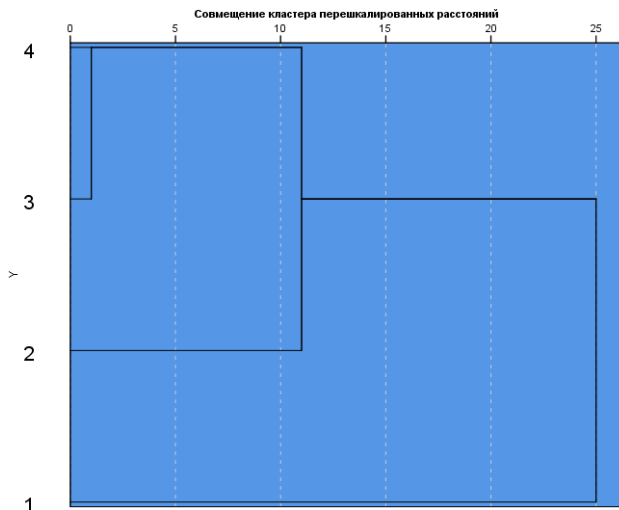


Рисунок 7. Кластерная диаграмма для сравнительного анализа авторской (методика 1) и существующих (2-4) методик (ось Y) автоматизированного управления работой лесосечных машин по критериям 3-5 из табл. 2  
Figure 7. Cluster diagram for comparative analysis of the author's (method 1) and existing (2-4) methods (Y-axis) of automated control of the operation of cutting machines according to criteria 3-5 in table 2

Источник: собственные результаты авторов  
Source: own results

### Обсуждение

Используемые машины должны быть максимально автоматизированы для снижения нагрузки на оператора, уменьшения совершаемых им ошибок. Например, определять характеристики древесины, автоматически определять породу дерева [58, 59, 60, 61, 62], а при работе в сложных условиях, таких как заготовка древесины в лесах, подвергшихся радиационному загрязнению [63], определять уровень радиационного загрязнения древесины.

Безусловным является также постепенность или этапность работ по созданию АОП и АОУ для лесосеки; в процессе которых определится экономически и производственно оптимальная по сложности система управления.

Проведенный анализ имеющихся методик автоматизированного управления работой лесозаготовительных машин показал, что рассматриваемые методики разноплановы и требуют обобщенности.

Методика 2 (табл. 2) ориентирована, в основном, на логистические операции по транспортировке леса.

Методики 3, 4 направлены на повышение эффективности использования отдельных машин.

Предлагаемая авторская методика автоматизированного управления работой лесосечных машин может быть создана как на базе специализированных программных решений отдельных производителей, так и на базе универсального программ-

ного обеспечения с установкой дополнительных модулей, позволяющих собирать необходимые данные о режимах работы лесосечных машин на каждой операции лесозаготовок, объему заготовленной древесины и состоянию технических средств.

Для автоматизированного решения задач оперативного управления лесосечными работами (состав, назначение и методика использования изложены выше) требуются следующие технические средства:

устройства для измерения объемов работ (УО) запоминания и передачи информации (УЗ и УП) на всех лесозаготовительных машинах;

пункт ретрансляции для организации передачи информации на сервер предприятия, ее обработки и выработки управляющих решений (УПР).

При разработке перечисленных средств оперативного управления следует иметь в виду, что они должны надежно работать в лесных условиях [64, 65].

Вычислительные, запоминающие устройства желательно использовать из серийно выпускаемых с возможностью блочной замены и ремонта. Большое значение имеет также стоимость и простота обслуживания.

### Заключение

Предлагаемая авторами методика дает возможность максимально реализовать заложенный изготовителем потенциал производительности каждой машины из комплекта, обеспечить требуемый объем выработки, уменьшить сроки разработки лесосеки при минимальных эксплуатационных затратах с учетом улучшения экологичности лесосечных машин.

В настоящее время проводятся работы по совершенствованию предлагаемой методики в области учета простоя машин по техническим причинам, в том числе по ТО и Р.

### Список литературы

1. Mokhirev A., Rukomoynikov K. Graphic-analytical modelling of technological chain of logging operations in dynamic natural and production conditions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019, v. 316, p. 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/01203.
2. Программное средство для нахождения оптимальной последовательности технологических операций производственного процесса лесозаготовительного предприятия / А. П. Мохирев, М. М. Герасимова, К. П. Рукомойников, Т. В. Сергеева // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2022. Т. 26, № 1. С. 114-125. DOI 10.18698/2542-1468-2022-1-114-125.
3. 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.
4. Рукомойников К. П., Мохирев А. П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 4(370). С. 94-107. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94.
5. Заикин А. Н., Меркелов В. М., Сиваков В. В. К вопросу оперативного планирования и управления лесосечными работами // Экономика и эффективность организации производства. 2020. № 32. С. 120-122.
6. Заикин А. Н. Типы и назначение запасов древесины в производственном процессе лесозаготовок // Лесн. журн. 2013. № 3. С. 71-78. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Заикин А. Н., Рыжикова Е. Г., Теремкова И. И. Метод оперативного планирования и управления лесосечными работами // Лесн. журн. 2017 № 2 С. 107-118 (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.107
8. Мохирев А. П., Горяева Е. В., Медведев С. О. Оценка технологических процессов лесозаготовительных предприятий // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 4(24). С. 139-147. DOI 10.12737/23448.

9. Design of logging infrastructure in consideration of the dynamically changing environment / A. Mokhiev, K. Rukomojnikov, M. Gerasimova, S. Medvedev // *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2021. Vol. 49, No. 3. P. 254-266. DOI 10.5658/WOOD.2021.49.3.254.
10. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера / К. П. Рукомойников, Т. В. Сергеева, Т. А. Гилязова [и др.] // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2023. Т. 27, № 3. С. 69-80. DOI 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80.
11. Автоматизация ведения учебно-методической документации образовательной организации / В. В. Сиваков, А. А. Соломников, И. Ю. Адамович, С. П. Строев // *Высшее образование в России*. 2021. Т. 30, № 8-9. С. 34-43. DOI 10.31992/0869-3617-2021-30-8-9-34-43.
12. Meissner H., Iلسena R., Auricha J. C. (2017). Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0//*Procedia CIRP*. Vol. 62. P. 165-169.
13. Kolberg D., Zühlke D. (2015). Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. December 2015 IFAC-Papers On Line 48(3):1870-1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359
14. 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
15. Сиваков В. В. Внедрение информационных технологий при организации пассажирских маршрутных перевозок в г.Брянске / В. В. Сиваков, К. С. Боровая // *Транспортное дело России*. 2019. № 4. С. 98-99.
16. The use of information technology in the design of chippers for the production of technological chips / V. Sivakov, S. Gryadunov, A. Buglaev [et al.] // *E3s web of conferences: VIII International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023)*, Krasnoyarsk, 29–31 марта 2023 года. Vol. 390. EDP Sciences: EDP Sciences, 2023. P. 03027. DOI 10.1051/e3sconf/202339003027.
17. Белов В. Ф. Архитектура цифровой платформы исследования и проектирования инноваций в машино- и приборостроении / В. Ф. Белов, С. С. Гаврюшин, А. И. Занкин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2021. № 3(732). С.3-15. DOI 10.18698/0536-1044-2021-3-3-15.
18. Бовтеев С. В. Разработка метода создания семейств строительных машин и оборудования для 3D и 4D моделирования / С. В. Бовтеев, Н. И. Веселова // *Системные технологии*. 2022. №3(44). С. 14-23. DOI: 10.55287/22275398\_2022\_3\_14.
19. Hawkes P., Kasper E. (1996). The Finite-Element Method (FEM). 10.1016/B978-012333340-7/50191-5.
20. Шантыко А. С. ОАО "Гомсельмаш": на пути к цифровизации производства / А. С. Шантыко, В. И. Козлов, С. В. Карабанькова // *Цифровая трансформация*. 2018. № 4. С. 16-26.
21. Erpalov A., Khoroshevskii K., Gadolina I. (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.
22. Sivakov V., Buglaev A., Zaikin A., Orekhovskaya A., Nurullin A., Razetdinov I. Improving the training of employees of logging enterprises in the field of labor protection. *E3S Web Conf*. 486 04007 (2024). DOI: 10.1051/e3sconf/202448604007.
23. 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02197-3>.
24. 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.
25. Ashtari B., Jung T., Lindemann B., Sahlab N., Jazdi, N., Schloegl, W., Weyrich M. (2019). An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System. *Automatisierungstechnik*. 67. 762-72. DOI: 10.1515/auto-2019-0039.8.



26. Shvedenko V., Mozokhin A. (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.
27. Linhares M., Sette Jr. C.R., Campos F., Yamaji F. (2012). Harvester and Forwarder machines efficiency and operational performance in forest harvesting. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 42. 212-219. DOI:10.1590/S1983-40632012000200007.
28. Danilović M., Antić S., Stojnić D., Cirović V., Milikić D. (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.
29. 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.
30. Labelle E. R., Kemmerer J. (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.
31. Söderberg J., Wallerman J., Almäng A., Möller J., Willén E. (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.
32. Безуглов А. Е., Кислицына О. А. Ключевые показатели эффективности при проведении технического обслуживания и ремонта оборудования // *Вопросы инновационной экономики*. 2019. Том 9. № 4. С. 1501-1514. doi: 10.18334/vines.9.4.41208.
33. Pomogaev V. M., Redreev G. V. Information support in the system of maintenance and repair of mobile machines in agriculture. *Vestnik of Omsk SAU*. 2022; 2(46): 145-152, DOI 10.48136/2222-0364\_2022\_2\_145.
34. Костыгов А. М. Автоматизированная информационная поддержка процессов планирования технического обслуживания и ремонта энергооборудования по фактическому состоянию / А. М. Костыгов, Д. К. Елтышев // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2019. Т. 17, № 4. С. 46-53. DOI: 10.18127/j20700814-201904-06. <https://elibrary.ru/ouggxk>.
35. Гончаров А. Б., Тулинов А. Б., Перепечай Б. А., Гончаров А. А. Методы организации системы технического обслуживания и ремонта оборудования с целью обеспечения его безотказной работы // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2017. № 2. С. 35-40.
36. Тугенгольд А. К., Волошин Р. Н., Юсупов А. Р., Круглова Т. Н. Техническое обслуживание технологических машин на базе цифровизации // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2019. Т.19. №1. С.74-80. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80.
37. Завьялов А. П. Диагностическое обслуживание оборудования и трубопроводов нефтегазовых производств при риск-ориентированном подходе к эксплуатации // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2020. № 3(117). С.79-81. DOI: 10.33285/1999-6934-2020-3(117)-79-81.
38. 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.
39. Kim G.-H., Kim, K.-D., Lee H.-S., Choi Y, Mun H.-S., Oh J.-H., Shin B.-S. (2021). Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.
40. Заикин А. Н., Теремкова И. И., Афоничев Д. Н. Методика автоматизированного оперативного планирования лесосечных работ. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2017. № 3 (54). С. 102-109.

41. Голубев И. Г., Мишуоров Н. П., Гольяпин В. Я., Апатенко А. С., Севрюгина Н. С. Системы телеметрии и мониторинга сельскохозяйственной техники: аналит. обзор. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. 76 с.
42. Keefe R., Zimbelman E., Picchi G. (2022). Use of Individual Tree and Product Level Data to Improve Operational Forestry. *Current Forestry Reports*. 8. 3. 10.1007/s40725-022-00160-3.
43. Picchi G., Sandak J., Grigolato S., Panzacchi P., Tognetti R. (2022). Smart Harvest Operations and Timber Processing for Improved Forest Management. 10.1007/978-3-030-80767-2\_9.
44. Torresan C., Benito-Garzon M., O'Grady M., Robson T. et al. (2021). A new generation of sensors and monitoring tools to support climate-smart forestry practices. *Canadian Journal of Forest Research*. 51. 10.1139/cjfr-2020-0295.
45. Kaulen A., Stopfer L., Lippert K., Purfürst T. (2023). Systematics of Forestry Technology for Tracing the Timber Supply Chain. *Forests*. 14. 10.3390/f14091718.
46. Pichler G., Sandak J., Picchi G., Kastner M. et al. (2022). Timber Tracking in a Mountain Forest Supply Chain: A Case Study to Analyze Functionality, Bottlenecks, Risks, and Costs. *Forests*. 13. 1373. 10.3390/f13091373.
47. Keefe R., Wempe A., Becker R., Zimbelman E., Nagler E., Gilbert S., Caudill C. (2019). Positioning Methods and the Use of Location and Activity Data in Forests. *Forests*. 10. 458. 10.3390/f10050458.
48. Zimbelman E., Keefe R. (2022). Lost in the woods: Forest vegetation, and not topography, most affects the connectivity of mesh radio networks for public safety. *PLOS ONE*. 17. e0278645. 10.1371/journal.pone.0278645.
49. Kim G.-H., Kim, K.-D., Lee H.-S., Choi Y, Mun H.-S., Oh J.-H., Shin B.-S. (2021). Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.
50. Lopatin E., Väättäin K., Kukko A. et al. (2023). Unlocking Digitalization in Forest Operations with Viewshed Analysis to Improve GNSS Positioning Accuracy. *Forests*. 14. 689. 10.3390/f14040689.
51. Программное обеспечение для управления системой технического обслуживания и ремонта лесных машин: оценка применимости / А. Н. Заикин, В. В. Сиваков, Т. П. Новикова [и др.] // *Лесотехнический журнал*. 2023. Т.13, № 2(50). С.105-127. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6.
52. 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.
53. Сафиуллин, Р. Н. Обоснование структуры автоматизированной системы контроля технического состояния транспортного средства на основе матричного QR-кода / Р. Н. Сафиуллин, О. П. Пыркин, К. В. Сорокин // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2023. № 2(64). С. 17-22. URL: <https://elibrary.ru/gblmxf>.
54. Kemmerer J., Labelle E. 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.
55. Запруднов В. И., Карпачев С. П., Быковский М. А. Потребность парка лесосечных машин в техническом обслуживании // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2017. Т. 21. № 2. С. 76–79. DOI:10.18698/2542-1468-2017-2-76-79.
56. Катаев Ю. В., Градов Е. А., Тишанинов И. А. Контроль технического состояния сельскохозяйственной техники через онлайн-мониторинг параметров // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2022; 1. DOI: 10.33920/sel-10-2201-03.
57. Erokhin M. N., Dorokhov A. S., Kataev Yu. V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;(2):45-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
58. Information support of the dynamics of system connectivity of wheel harvester operations / F. Svoikin, V. Svoikin, S. Bazarov [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* : 2, Saint Petersburg, Virtual, 18–19 марта 2021 года. – Saint Petersburg, Virtual, 2021. – P. 012031. DOI 10.1088/1755-1315/806/1/012031.

59. Информационное обеспечение динамики системной связности операций валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины / Ф. В. Свойкин, В. Ф. Свойкин, С. М. Базаров, С. А. Угрюмов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 2. С. 37-41. DOI 10.31044/1684-2561-2022-0-2-37-41.
60. Размерно-качественные характеристики круглых сортиментов, заготавливаемых с применением многооперационных лесных машин / К. Д. Жук, С. А. Угрюмов, Ф. В. Свойкин, В. Ф. Свойкин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 5(389). С. 114-130. DOI 10.37482/0536-1036-2022-5-114-130.
61. Жук К. Д. Распознавание пород деревьев в процессе лесозаготовки с применением методов машинного обучения / К. Д. Жук, С. А. Угрюмов, Ф. В. Свойкин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 242. С.167-178. DOI 10.21266/2079-4304.2023.242.167-178.
62. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681124 Российская Федерация. Программа определения породы ствола заготавливаемого дерева для валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин stmPredict : № 2023669997 : заявл. 29.09.2023 : опублик. 10.10.2023 / К. Д. Жук, С. А. Угрюмов, Ф. В. Свойкин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова».
63. Повышение эффективности работы машин и оборудования при заготовке древесины в лесах с радиоактивным загрязнением / А. Н. Заикин, А. С. Торопов, В. М. Меркелов, В. В. Сиваков // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 1(373). С. 113-127. DOI 10.37482/0536-1036-2020-1-113-127.
64. 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 [и др.] // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13, № 3(51). С. 200-218. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14.
65. 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. 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80.
66. 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. – URL: <https://elibrary.ru/tondhd>.
67. 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. URL: <https://elibrary.ru/vxxdjz>.
68. Затворницкий, А. П. Оптимальное планирование комплексных проектов создания электронной компонентной базы / А. П. Затворницкий // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 3(65). – С. 5-10. – URL: <https://www.elibrary.ru/ntnxin>.
69. 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>.
70. 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>.
71. 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>. URL: <https://elibrary.ru/dkxphx>.
72. 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>.
73. 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. URL: <https://elibrary.ru/slkaqt>.

74. Патент № 2714705 Российская Федерация, МПК A01G 23/00. Способ восстановления леса : № 2019115418 : заявл. 20.05.2019 : опубл. 19.02.2020 / А. И. Новиков. – URL: <https://www.elibrary.ru/gzdlvj>.
75. 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.]. – URL: <https://www.elibrary.ru/nrywgh>.
76. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/qdcyju>.
77. 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>.
78. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/sjqbtb>.
79. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/tjbbkj>.
80. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/rewhat>.
81. Облачные технологии – становление и перспективы развития / В. В. Лядов [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2013. – № 1. – С. 37-39. – URL: <https://www.elibrary.ru/rbpjfr>.
82. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/PJGNOX>.
83. Алгоритм анализа клиентской базы торговой организации / С. А. Евдокимова [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 24-35. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-1-24-35. – URL: <https://www.elibrary.ru/YJSTFW>.
84. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/jenghb>.

### References

1. Mokhiev A., Rukomoynikov K. Graphic-analytical modelling of technological chain of logging operations in dynamic natural and production conditions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019, v. 316, p. 012039. DOI: 10.1088/1755-1315/316/1/012039.
2. Programmnoe sredstvo dlya nahozhdeniya optimal'noj posledovatel'nosti tekhnologicheskikh operacij proizvodstvennogo processa lesozagotovitel'nogo predpriyatiya / A. P. Mohirev, M. M. Gerasimova, K. P. Rukomojniov, T. V. Sergeeva // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. 2022. T. 26, № 1. S. 114-125. DOI 10.18698/2542-1468-2022-1-114-125.
3. Rukomojniov K. P., Mohirev A. P. Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy lesozagotovitel'nyh rabot putem sozdaniya dinamicheskoy modeli funkcionirovaniya predpriyatiya // IVUZ Lesnoj zhurnal, 2019. № 4 (370). S. 94-107. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94
4. Rukomojniov K. P., Mohirev A. P. Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy lesozagotovitel'nyh rabot putem sozdaniya dinamicheskoy modeli funkcionirovaniya predpriyatiya // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2019. № 4(370). S. 94-107. DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94.

5. Zaikin A. N., Merkelov V. M., Sivakov V. V. K voprosu operativnogo planirovaniya i upravleniya lesosechnymi rabotami // *Ekonomika i effektivnost' organizacii proizvodstva*. 2020. № 32. S. 120-122.
6. Zaikin A. N. Tipy i naznachenie zapasov drevesiny v proizvodstvennom processe lesozagotovok // *Lesn. zhurn.* 2013. № 3. S. 71-78. (Izv. vyssh. ucheb. zavedenij).
7. Zaikin A. N., Ryzhikova E. G., Teremkova I. I. Metod operativnogo planirovaniya i upravleniya lesosechnymi rabotami // *Lesn. zhurn.* 2017 № 2 S. 107-118 (Izv. vyssh. ucheb. zavedenij). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.2.107
8. Mohirev A. P., Goryaeva E. V., Medvedev S. O. Ocenka tekhnologicheskikh processov lesozagotovitel'nykh predpriyatij // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2016. T. 6, № 4(24). S. 139-147. DOI 10.12737/23448.
9. Design of logging infrastructure in consideration of the dynamically changing environment / A. Mokhirev, K. Rukomojnikov, M. Gerasimova, S. Medvedev // *Journal of the Korean Wood Science and Technology*. 2021. Vol. 49, No. 3. P. 254-266. DOI 10.5658/WOOD.2021.49.3.254.
10. Imitacionnoe modelirovanie tekhnologicheskogo processa zagotovki drevesiny na primere lesnogo harvestera / K. P. Rukomojnikov, T. V. Sergeeva, T. A. Gilyazova [i dr.] // *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*. 2023. T. 27, № 3. S. 69-80. DOI 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80.
11. Avtomatizaciya vedeniya uchebno-metodicheskoy dokumentacii obrazovatel'noj organizacii / V. V. Sivakov, A. A. Solomnikov, I. Yu. Adamovich, S. P. Stroev // *Vysshee obrazovanie v Rossii*. 2021. T. 30, № 8-9. S. 34-43. DOI 10.31992/0869-3617-2021-30-8-9-34-43.
12. Meissner H., Iلسena R., Auricha J. C. (2017). Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0//*Procedia CIRP*. Vol. 62. P. 165-169.
13. Kolberg D., Zühlke D. (2015). Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. December 2015 IFAC-Papers On Line 48(3):1870-1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359
14. 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
15. Sivakov V. V. Vnedrenie informacionnykh tekhnologij pri organizacii passazhirskih marshrutnykh perevozok v g. Bryanske / V. V. Sivakov, K. S. Borovaya // *Transportnoe delo Rossii*. 2019. № 4. S.98-99.
16. The use of information technology in the design of chippers for the production of technological chips / V. Sivakov, S. Gryadunov, A. Buglaev [et al.] // *E3s web of conferences: VIII International Conference on Advanced Agritechnologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023)*, Krasnoyarsk, March 29–31, 2023. Vol. 390. EDP Sciences: EDP Sciences, 2023. P. 03027. DOI 10.1051/e3sconf/202339003027.
17. Belov V. F. Arhitektura cifrovoj platformy issledovaniya i proektirovaniya innovacij v mashino- i priborostroenii / V. F. Belov, S. S. Gavryushin, A. I. Zankin // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie*. 2021. № 3(732). S.3-15. DOI 10.18698/0536-1044-2021-3-3-15.
18. Bovtееv S. V. Razrabotka metoda sozdaniya semejstv stroitel'nykh mashin i oborudovaniya dlya 3D i 4D modelirovaniya / S. V. Bovtееv, N. I. Veselova // *Sistemnye tekhnologii*. 2022. №3(44). S. 14-23. DOI: 10.55287/22275398\_2022\_3\_14.
19. Hawkes P., Kasper, E. (1996). The Finite-Element Method (FEM). 10.1016/B978-012333340-7/50191-5.
20. Shantyko A. S. OAO "Gomsel'mash": na puti k cifrovizacii proizvodstva / A. S. Shantyko, V. I. Kozlov, S. V. Karaban'kova // *Cifrovaya transformaciya*. 2018. № 4. S. 16-26.
21. Erpalov A., Khoroshevskii K., Gadolina I. (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.
22. Sivakov V., Buglaev A., Zaikin A., Orekhovskaya A., Nurullin A., Razetdinov I. Improving the training of employees of logging enterprises in the field of labor protection. *E3S Web Conf.* 486 04007 (2024). DOI: 10.1051/e3sconf/202448604007.

23. 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02197-3>.
24. 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.
25. Ashtari B., Jung T., Lindemann B., Sahlab N., Jazdi, N., Schloegl, W., Weyrich M. (2019). An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System. *Automatisierungstechnik*. 67. 762-72. DOI: 10.1515/auto-2019-0039.8.
26. Shvedenko V., Mozokhin A. (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.
27. Linhares M., Sette Jr. C.R., Campos F., Yamaji F. (2012). Harvester and Forwarder machines efficiency and operational performance in forest harvesting. *Pesquisa Agropecuária Tropical*. 42. 212-219. DOI:10.1590/S1983-40632012000200007.
28. Danilović M., Antonić S., Stojnić D., Cirovic V., Milikić D. (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.
29. 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.
30. Labelle E. R., Kemmerer J. (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.
31. Söderberg J., Wallerman J., Almäng A., Möller J., Willén E. (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.
32. Bezuglov A. E., Kislicyna O. A. Klyuchevye pokazateli effektivnosti pri provedenii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya // *Voprosy innovacionnoj ekonomiki*. 2019. Tom 9. № 4. S. 1501-1514. doi: 10.18334/vinec.9.4.41208.
33. Pomogaev V. M., Redreev G. V. Information support in the system of maintenance and repair of mobile machines in agriculture. *Vestnik of Omsk SAU*. 2022; 2(46): 145-152, DOI 10.48136/2222-0364\_2022\_2\_145.
34. Kostygov A. M., Eltyshv D. K. Automated information support for planning process of power equipment technical maintenance and repair based on actual condition. *Information-measuring and Control Systems*. 2019; 17(4): 46-53. URL: <https://elibrary.ru/ouggxk>.
35. Goncharov A. B., Tulinov A. B., Perepechaj B. A., Goncharov A. A. Metody organizacii sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya s cel'yu obespecheniya ego bezotkaznoj raboty // *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*. 2017. № 2. C.35-40.
36. Tugengol'd A. K., Voloshin R. N., Yusupov A. R., Kruglova T. N. Tekhnicheskoe obsluzhivanie tekhnologicheskikh mashin na baze cifrovizacii // *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019. T.19. №1. S.74-80. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80.
37. Zav'yalov A. P. Diagnosticheskoe obsluzhivanie oborudovaniya i truboprovodov neftegazovyh proizvodstv pri risk-orientirovannom podhode k ekspluatatsii // *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*. 2020. № 3(117). S.79-81. DOI: 10.33285/1999-6934-2020-3(117)-79-81.
38. 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-tehnicheskikh nauk. 2020. T.65. №3. S.375-383. DOI 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.

39. Kim G-H., Kim, K.-D., Lee H.-S., Choi Y, Mun H.-S., Oh J.-H., Shin B.-S. (2021). Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.

40. Zaikin A. N., Teremkova I. I., Afonichev D. N. Metodika avtomatizirovannogo operativnogo planirovaniya lesosechnyh rabot. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2017. № 3 (54). S.102-109.

41. Golubev I. G., Mishurov N. P., Gol'tyapin V. Ya., Apatenko A. S., Sevryugina N. S. Sistemy telemekhnik i monitoringa sel'skohozyajstvennoj tekhniki: analit. obzor. M.: FGBNU «Rosinformagrotekh», 2020. 76 s.

42. Keefe R., Zimbelman E., Picchi G. (2022). Use of Individual Tree and Product Level Data to Improve Operational Forestry. *Current Forestry Reports*. 8. 3. 10.1007/s40725-022-00160-3.

43. Picchi G., Sandak J., Grigolato S., Panzacchi P., Tognetti R. (2022). Smart Harvest Operations and Timber Processing for Improved Forest Management. 10.1007/978-3-030-80767-2\_9.

44. Torresan C., Benito-Garzon M., O'Grady M., Robson T. et al. (2021). A new generation of sensors and monitoring tools to support climate-smart forestry practices. *Canadian Journal of Forest Research*. 51. 10.1139/cjfr-2020-0295.

45. Kaulen A., Stopfer L., Lippert K., Purfürst T. (2023). Systematics of Forestry Technology for Tracing the Timber Supply Chain. *Forests*. 14. 10.3390/f14091718.

46. Pichler G., Sandak J., Picchi G., Kastner M. et al. (2022). Timber Tracking in a Mountain Forest Supply Chain: A Case Study to Analyze Functionality, Bottlenecks, Risks, and Costs. *Forests*. 13. 1373. 10.3390/f13091373.

47. Keefe R., Wempe A., Becker R., Zimbelman E., Nagler E., Gilbert S., Caudill C. (2019). Positioning Methods and the Use of Location and Activity Data in Forests. *Forests*. 10. 458. 10.3390/f10050458.

48. Zimbelman E., Keefe R. (2022). Lost in the woods: Forest vegetation, and not topography, most affects the connectivity of mesh radio networks for public safety. *PLOS ONE*. 17. e0278645. 10.1371/journal.pone.0278645.

49. Kim G-H., Kim, K.-D., Lee H.-S., Choi Y, Mun H.-S., Oh J.-H., Shin B.-S. (2021). Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *Journal of Biosystems Engineering*. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2.

50. Lopatin E., Väättäinen K., Kukko A. et al. (2023). Unlocking Digitalization in Forest Operations with Viewshed Analysis to Improve GNSS Positioning Accuracy. *Forests*. 14. 689. 10.3390/f14040689.

51. Programmnoe obespechenie dlya upravleniya sistemoy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta lesnyh mashin: ozenka primenimosti / A. N. Zaikin, V. V. Sivakov, T. P. Novikova [i dr.] // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2023. T.13, № 2(50). S.105-127. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6.

52. Programmnoe obespechenie dlya upravleniya lesokhozyajstvennym i lesozagotovitel'nym processami: ozenka 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.

53. Safiullin R. N., Pyrkin O. P., Sorokin K. V. An adaptively managed approach to optimizing the supply of spare parts to vehicles based on functional diagnostics using a matrix QR code. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa [Technical and technological problems of service]*. 2023; 2(64): 17-22. URL: <https://elibrary.ru/gblmxf>.

54. Kemmerer J., Labelle E. 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.

55. Zaprudnov V. I., Karpachev S. P., Bykovskij M. A. Potrebnost' parka lesosechnyh mashin v tekhnicheskoy obsluzhivaniy // *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*. 2017. V. 21. № 2. S.76-79. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-2-76-79.

56. Kataev Yu. V., Gradov E. A., Tishaninov I. A. Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki cherez onlajn-monitoring parametrov. *Sel'skohozyajstvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont*. 2022; 1. DOI: 10.33920/sel-10-2201-.

57. Erokhin M. N., Dorokhov A. S., Kataev Yu. V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2021;(2):45-50. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
58. Information support of the dynamics of system connectivity of wheel harvester operations / F. Svoikin, V. Svoikin, S. Bazarov [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* : 2, Saint Petersburg, Virtual, 18–19 марта 2021 года. – Saint Petersburg, Virtual, 2021. – P. 012031. DOI 10.1088/1755-1315/806/1/012031.
59. Информационное обеспечение динамики системной связности операций валочно-сучкорезно-раскряжевой машины / F. V. Svoikin, V. F. Svoikin, S. M. Bazarov, S. A. Ugryumov // *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*. 2022. № 2. S. 37-41. DOI 10.31044/1684-2561-2022-0-2-37-41.
60. Razmerno-kachestvennye harakteristiki kruglyh sortimentov, zagotavlivaemyh s primeneniem mno-goopерационnyh lesnyh mashin / K. D. Zhuk, S. A. Ugryumov, F. V. Svoikin, V. F. Svoikin // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2022. № 5(389). S. 114-130. DOI 10.37482/0536-1036-2022-5-114-130.
61. Zhuk K. D. Raspoznavanie porod derev'ev v processe lesozagotovki s primeneniem metodov mashinno-go obucheniya / K. D. Zhuk, S. A. Ugryumov, F. V. Svoikin // *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy aka-demii*. 2023. № 242. S.167-178. DOI 10.21266/2079-4304.2023.242.167-178.
62. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2023681124 Rossijskaya Fe-deraciya. Programma opredeleniya porody stvola zagotavlivaemogo dereva dlya valочно-сучкорезно-раскряжевой машины stmPredict : № 2023669997 : zayavl. 29.09.2023 : opubl. 10.10.2023 / K. D. Zhuk, S. A. Ugryumov, F. V. Svoikin; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet imeni S.M. Ki-rova».
63. Povyshenie effektivnosti raboty mashin i oborudovaniya pri zagotovke drevesiny v lesah s radioaktivnym zagryazneniem / A. N. Zaikin, A. S. Toropov, V. M. Merkelov, V. V. Sivakov // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2020. № 1(373). S. 113-127. DOI 10.37482/0536-1036-2020-1-113-127.
64. Cifrovizaciya sistemy organizacii rabochih processov lesozagotovitel'nyh mashin: ocenka effektivnosti na primere «Ponsse», «Komatsu» i «John Deere» / V. V. Sivakov, A. N. Zaikin, T. P. Novikova [i dr.] // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2023. T. 13, № 3(51). S. 200-218. DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/14.
65. 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. 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80.
66. 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>.
67. 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>.
68. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/ntnxin>.
69. 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>.
70. Sokolov S. V. Determining the Initial Orientation for Navigation and Measurement Systems of Mobile Apparatus in Reforestation / S. V. Sokolov, A. I. Novikov, V. Ivetic // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 56. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4040056>.



71. 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. Ivetic // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/dkxphx>.
72. 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>.
73. 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>.
74. Patent No. 2714705 Russian Federation. Method of forest restoration / A. I. Novikov. – URL: <https://www.elibrary.ru/gzdlvj>.
75. 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.]. – URL: <https://www.elibrary.ru/nrywgh>.
76. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/qdcyfv>.
77. 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>.
78. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/sjqbtb>.
79. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/tjbbkj>.
80. 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. – URL: <https://www.elibrary.ru/rewhat>.
81. Cloud technologies – formation and prospects of development / V. V. Lyadov [et al.] // *Modeling of systems and processes*. – 2013. – No. 1. – pp. 37-39. – URL: <https://www.elibrary.ru/rbpjfr>.
82. 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/PJGN0X>.
83. 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>.
84. 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. – С. 24-33. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-4-24-33. – URL: <https://www.elibrary.ru/jcnghb>.

### Сведения об авторах

*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, 241037, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1831-6893>, e-mail: [zaikin.anatolij@yandex.ru](mailto:zaikin.anatolij@yandex.ru).

*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, 241037, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, e-mail: [sv@bgitu.ru](mailto:sv@bgitu.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, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.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, 220006, Республика Беларусь, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: [offlex88@belstu.by](mailto:offlex88@belstu.by).

*Новиков Артур Игоревич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: [arthur.novikov@vglta.vrn.ru](mailto:arthur.novikov@vglta.vrn.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).

### Information about the authors

*Anatolii N. Zaikin* – Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Engineering and Technological University, 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).

*Vladimir V. Sivakov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Service, Bryansk State Engineering and Technological University, 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).

✉ *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, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

*Alexey S. Chuikov* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarussian State Technological University, 13a Sverdlov str., Minsk, 220006, Belarus, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: [offlex88@belstu.by](mailto:offlex88@belstu.by).

*Arthur I. Novikov* – Dr. Sci. (Tech.), professor, Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., 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).

*Vladimir V. Stasyuk* – 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, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8689-955X>, e-mail: [stasiuk.volodya@yandex.ru](mailto:stasiuk.volodya@yandex.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Краткое сообщение


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/13>

УДК 630\*432.1




## К вопросу о неравномерности уровней почвенно-грунтовых вод на примере Архангельской области в контексте использования установок водопонижения при тушении лесных пожаров


Анатолий С. Лоренц<sup>1</sup> ✉, a.lorents@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0906-8779>

Алексей В. Прохоров<sup>1</sup>, a.prohorov@narfu.ru  <http://orcid.org/0000-0003-0091-3988>

Ольга И. Григорьева<sup>2</sup>, grigoreva\_o@list.ru  <http://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Игорь В. Григорьев<sup>3</sup>, silver73@inbox.ru  <http://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Георгий А. Калита<sup>4</sup>, g.kalita@mail.ru  <http://orcid.org/0000-0003-3232-6841>

Владимир А. Морковин<sup>5</sup>, morkovin-vladimir@mail.ru  <http://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, Архангельск, 163002, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский переулок, 5, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Сергеляхское шоссе, 3 км, д. 3, Якутск, 677007, Российская Федерация

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, 680035, Российская Федерация

<sup>5</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация

Грунтовые гравитационные воды, находящиеся между поверхностным слоем и слоем водонепроницаемой породы (инфильтрационное происхождение), характеризуются способностью к перемещению с заполнением имеющихся возможных пустот в грунте. Прокладка гидрогеологических створов для изучения уклона уровня залегания почвенно-грунтовых гравитационных вод к месту разгрузки (ручьи, реки, озера, низинные болота) на лесных площадях, подверженных пожарной опасности, не всегда достоверно оценивает равномерность (или неравномерность) их залегания. Для проведения натурного эксперимента, подтверждающего гипотезу неравномерности залегания уровня грунтовых вод по отношению к месту разгрузки (на примере Архангельской области), выбран вариант, основанный на принципе создания исследуемой плоскости методом бурения скважин в двух перпендикулярных направлениях через равные промежутки. Расстояние между скважинами выбирали исходя из принятой площади наблюдения и необходимой точности получаемого результата. Исследование проводили с 1 июня 2022 г. по 28 августа 2022 г. Результаты доказывают неравномерность залегания уровня (минимальный наблюдаемый экстремум – 21 см, максимальный – 100 см, среднее значение колебаний уровня – 27,8 см) грунтовых вод по отношению к месту разгрузки на примере Архангельской области. В будущем результаты возможно использовать для позиционирования установок водопонижения при тушении лесных пожаров.

**Ключевые слова:** уровень грунтовых вод, Архангельская область, экспериментальное исследование, лес, водопонижение, тушение лесных пожаров

**Финансирование:** работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства». Часть материалов исследования получена при выполнении работ по гранту Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

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


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


**Для цитирования:** К вопросу о неравномерности уровней почвенно-грунтовых вод на примере Архангельской области в контексте использования установок водопонижения при тушении лесных пожаров / А. С. Лоренц, А. В. Прохоров, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев, Г. А. Калита, В. А. Морковин // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 227–238. – *Библиогр.: с. 234–237 (25 назв.).* – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/13>.

*Поступила* 18.04.2024. *Пересмотрена* 17.05.2024 *Принята* 23.05.2024 *Опубликована онлайн* 17.06.2024

### Short communication

## On the issue of uneven groundwater levels based on Arkhangelsk region in the context of the dewatering installations used for extinguishing forest fires


Anatoly S. Lorentz<sup>1</sup>✉, [a.lorents@narfu.ru](mailto:a.lorents@narfu.ru),  <https://orcid.org/0000-0002-0906-8779>

Alexey V. Prokhorov<sup>1</sup>, [a.prohorov@narfu.ru](mailto:a.prohorov@narfu.ru)  <http://orcid.org/0000-0003-0091-3988>

Olga I. Grigoreva<sup>2</sup>, [grigoreva\\_o@list.ru](mailto:grigoreva_o@list.ru)  <http://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

Igor V. Grigorev<sup>3</sup>, [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru)  <http://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

Georgy A. Kalita<sup>4</sup>, [g.kalita@mail.ru](mailto:g.kalita@mail.ru)  <http://orcid.org/0000-0003-3232-6841>

Vladimir A. Morkovin<sup>5</sup>, [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru)  <http://orcid.org/0000-0003-5822-2254>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 163002, Arkhangelsk, Northern Dvina embankment, 17, Russian Federation

<sup>2</sup>St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, Institutsky Lane, 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation

<sup>3</sup>Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoe Hw, 3 km., 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation

<sup>4</sup>Pacific State University, Pacific str., 136, Khabarovsk, 680035, Russian Federation

<sup>5</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

### Abstract

The ground gravity waters located between the surface layer and the layer of waterproof rock (infiltration origin) are characterized by the ability to move with filling of the available possible voids in the soil. The laying of hydrogeological gates to study the slope of the level of occurrence of soil-groundwater gravity waters to the place of discharge (streams, rivers, lakes, lowland swamps) in forest areas exposed to fire danger does not always reliably assess the uniformity (or unevenness) of their occurrence. To conduct a full-scale experiment confirming the hypothesis of uneven occurrence of the groundwater level in relation to the unloading site (using the example of the Arkhangelsk region), an option based on the principle of creating the plane under study by drilling wells in two perpendicular directions at regular intervals was chosen. The distance between the wells was chosen based on the accepted observation area and the required accuracy of the result obtained. The study was conducted from June 1, 2022 to August 28, 2022. The results prove the uneven occurrence of the level (the minimum observed extreme is 21 cm, the maximum is 100 cm, the average value of level fluctuations is 27.8 cm) of groundwater in relation to the unloading site using the example of the Arkhangelsk region. In the future, the results may be used to position of dewatering installations when extinguishing forest fires.

**Keywords:** *groundwater level, Arkhangelsk region, experimental research, forest, dewatering, extinguishing forest fires*

**Funding:** this study was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry". Some of the research materials were obtained while performing work under the grant of the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

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

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

**For citation:** Lorentz A. S., Prokhorov A. V., Grigoreva O. I., Grigorev I. V., Kalita G. A., Morkovin V. A. (2024). On the issue of uneven groundwater levels based on Arkhangelsk region in the context of the dewatering installations used for extinguishing forest fires. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 227-238 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/13>.

*Received* 18.04.2024. *Revised* 17.05.2024. *Accepted* 23.05.2024. *Published online* 17.06.2024.

## Введение

Ежегодно лесные пожары уничтожают обширные территории таежных лесов Европейской части РФ и Сибири. Только за 2022 год на территории Российской Федерации по данным Рослехоза выгорело около 3,5 млн гектаров лесов [5, 8]. Одной из проблем тушения лесных пожаров являются недостаточность источников воды и трудность с использованием имеющихся водоемов для пожаротушения [1-3]. Одним из перспективных методов тушения лесных пожаров является использование иглофильтрационных установок вакуумного водопонижения, преимущества которых рассмотрены в [18, 19]. Однако, для введения в практику лесного пожаротушения данных установок необходимо изучить специфику распределения почвенно-грунтовых вод под лесными массивами.

Уровень почвенно-грунтовых вод на обширных территориях на данный момент изучается путем прокладки гидрогеологических створов [7]. Такой способ исследования гидрогеологических особенностей лесных территорий не позволяет оценить все факторы, влияющие как на глубину залегания грунтовых вод, так и на неравномерность уклона уровня залегания грунтовых вод к месту разгрузки (низинные болота, ручьи, реки, озера и т.п.).

При сравнительно неглубоком залегании грунтовых вод от дневной поверхности в почвенном профиле выделяются 3 зоны: избытка влаги, опти-

мального увлажнения и недостатка влаги, отличающиеся качественно по водно-воздушному режиму [10, 11, 13]. Для эффективного использования иглофильтрационных водопонижающих установок важно располагать их в зоне оптимального увлажнения и ниже, чтобы поступление влаги к иглофильтрам было постоянным [16, 20].

Целью исследования является построение модели залегания уровня почвенно-грунтовых вод по отношению к месту разгрузки на участке с однородным растительным и почвенным покровом.

## Материалы и методы

### *Объект и предмет исследования*

Объектом исследования является неравномерность уровней почвенно-грунтовых вод в Архангельской области, в контексте их влияния на эффективность использования установок водопонижения при тушении лесных пожаров. Предметом исследования являются методы и технологии водопонижения, а также особенности их применения при тушении лесных пожаров.

Для проведения натурального эксперимента был выбран участок сосняка черничного IV класса бонитета на торфяно-подзолисто-глеевой почве. Участок исследования был выбран на труднодоступной территории с отсутствием водоемов, подходящих для эффективного пожаротушения – о. Линский Прилук в дельте р.Северная Двина. Данная территория является частью городской территории. Разгрузка почвенно-грунтовых вод происходит в исток

реки Муткурьи и верховое болото, располагающееся на северо-востоке от участка исследования (рис. 1).

### *Сбор и анализ данных*

В исследовании использовали метод построения графической модели стока почвенно-грунтовых вод, основанный на принципе создания исследуемой плоскости методом бурения скважин в двух перпендикулярных направлениях через равные промежутки [12, 17]. Расстояние между скважинами было выбрано исходя из площади однородного участка сосняка черничного и необходимой точности получаемого результата. Исходя из таксационной характеристики исследуемого участка лесного массива уровень приема модулем беспроводного сигнала может варьироваться в широком диапазоне значений расстояния. Соответственно максимально возможное расстояние, на которое могут быть установлены микроконтроллеры, должны подбираться эмпирически в зависимости от условий окружающей среды.

Предварительное бурение и установка контрольно-измерительного оборудования на территории лесонасаждений Архангельской области показала достаточную точность измеряемых показателей при отдаленности скважин на расстоянии 50 м друг от друга.

На рис. 1 представлена карта местности с нанесенными координатами в количестве 25 точек, обозначенных на отдалении 50 метров друг от друга. Табл. 1 демонстрирует координатную сетку экспериментального исследования.



Рисунок 1. Карта местности проведения эксперимента

Figure 1. Map of the area of the experiment

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Для повышения точности позиционирования измерительных скважин были применены системы глобального позиционирования через спутниковую навигацию. В каждой измерительной скважине установлено измерительное оборудование с программируемым микроконтроллером и присвоен условный номер, включающий в себя порядковые номера ряда и номер скважины. Бурение измерительных скважин проводили при помощи ручного бура «Мобил К БР-150 Комфорт». Первичное разведывательное бурение местности показало, что максимально необходимое заглубление для получения точных показателей может не превышать 150 см. Общий вид участка заложения измерительной скважины приведен на рис. 2.

Таблица 1

Координатная сетка проведения экспериментального исследования

Table 1

Coordinate grid of the experimental study

64°41'08.2"N 40°27'21.7"E	64°41'08.2"N 40°27'25.5"E	64°41'08.2"N 40°27'29.4"E	64°41'08.3"N 40°27'33.3"E	64°41'08.3"N 40°27'37.1"E
64°41'06.5"N 40°27'21.6"E	64°41'06.6"N 40°27'25.5"E	64°41'06.6"N 40°27'29.4"E	64°41'06.6"N 40°27'33.2"E	64°41'06.6"N 40°27'37.1"E
64°41'04.9"N 40°27'21.5"E	64°41'04.9"N 40°27'25.4"E	64°41'04.9"N 40°27'29.3"E	64°41'04.9"N 40°27'33.1"E	64°41'04.8"N 40°27'37.0"E
64°41'03.2"N 40°27'21.6"E	64°41'03.3"N 40°27'25.4"E	64°41'03.2"N 40°27'29.3"E	64°41'03.2"N 40°27'33.2"E	64°41'03.2"N 40°27'37.1"E
64°41'01.5"N 40°27'21.4"E	64°41'01.5"N 40°27'25.3"E	64°41'01.5"N 40°27'29.2"E	64°41'01.4"N 40°27'33.1"E	64°41'01.4"N 40°27'37.0"E

Источник: собственные вычисления авторов / Source: own calculations



Рисунок 2. Бурение лунок по контрольным координатам

Figure 2. Drilling holes on control coordinates

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

Также во время проведения эксперимента выявлена необходимость в изолировании скважины на уровне поверхности для исключения попадания внутрь земноводных и мелких млекопитающих, что существенно увеличивает трудоемкость поиска скважин для снятия информации при классическом методе сбора данных. Уменьшение трудоемкости сбора исследуемой информации в представленном

варианте достигается использованием технологий беспроводной передачи данных и их аккумулярование на твердотельном накопителе, подключенному к программируемому микроконтроллеру, с которого информация передается посредством GSM-технологий.

Исследование проводилось с 1 июня 2022 г. по 28 августа 2022 г. С 18 по 30 августа 2022 года из-за аномально сухой и жаркой погоды в Архангельской области установлен особый противопожарный режим, запрещающий нахождение населения в лесополосе. Описанный выше вариант получения экспериментальных данных позволил не прерывать проведение эксперимента и выполнить его в полном объеме.

## Результаты

Табл. 2 демонстрирует значения залегания уровня грунтовых вод, структурированные по неделям для уменьшения массива данных.

Таблица 2

Полученные экспериментальные данные исследования уровня грунтовых вод

Table 2

Obtained experimental data from the study of the groundwater level

Номер Num- ber	Уровень грунтовых вод, см   Groundwater level, cm													Среднее значение, Average value, cm	Среднекв. отклон., см Standard deviation, cm
	05.06	12.06	19.06	26.06	03.07	10.07	17.07	24.07	31.07	07.08	14.08	21.08	28.08		
1	95	94	92	90	89	88	96	87	88	86	90	83	75	88,65	5,57
2	56	56	57	60	64	58	56	46	34	46	54	56	58	53,94	7,75
3	61	61	59	54	65	70	62	64	36	48	62	63	64	59,18	8,77
4	64	65	67	78	70	68	63	63	53	57	60	58	56	63,23	6,70
5	85	86	87	83	95	95	84	100	84	85	95	96	97	90,14	6,18
6	74	75	78	76	75	74	70	77	57	64	70	71	71	69,88	4,97
7	46	48	52	60	60	54	44	36	27	39	53	63	72	50,31	12,15
8	41	42	44	50	50	48	40	40	21	34	42	44	45	41,58	7,59
9	44	46	49	56	48	47	43	41	25	35	47	45	43	43,76	7,40
10	62	63	64	61	70	75	62	68	44,5	53	68	70	71	63,92	8,10
11	75	74	71	69	78	78	77	82	56	62	66	69	72	71,46	7,19
12	70	68	65	66	64	68	71	65	35	52	59	60	60	61,74	9,57
13	73	74	75	74	75	80	72	77	60	69	80	78	76	74,06	5,25
14	77	78	79	81	80	86	77	82	69	73	78	78	77	78,03	4,10

Номер  Num- ber	Уровень грунтовых вод, см   Groundwater level, cm												Среднее значение, см   Average value, cm	Среднекв. отклон., см   Standard deviation, cm	
	05.06	12.06	19.06	26.06	03.07	10.07	17.07	24.07	31.07	07.08	14.08	21.08			28.08
15	63	63	62	60	78	80	63	69	48,5	56	64	66	68	64,64	8,26
16	73	73	71	71	78	76	74	75	59	67	69	68	67	70,87	4,97
17	61	62	63	66	73	67	60	61	40	51	63	63	62	60,83	7,95
18	53	53	52	50	69	62	53	53	26	40	54	55	56	51,99	10,19
19	63	62	59	60	72	68	64	66	42	54	53	59	65	60,48	7,65
20	70	70	69	70	78	76	70	75	58	63	68	70	72	69,91	5,22
21	63	63	63	64	68	75	63	69	56	57	62	62	61	63,50	4,96
22	62	63	64	64	73	76	61	70	50	56	68	66	64	64,37	6,80
23	57	57	58	59	69	67	57	59	36	49	57	59	60	57,21	8,00
24	47	48	48	46	60	57	47	49	26	42	52	53	54	48,41	8,30
25	61	61	60	58	65	69	61	68	45	49	61	61	61	59,94	6,61

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Полученные результаты демонстрируют минимальный наблюдаемый экстремум в 21 см. и максимальный, равный 100 см. Среднее значение колебаний уровня 27,8 см. Явно выраженного уклона уровня не выявлено, что доказывает неравномерность залегания грунтовых вод.

### Обсуждение

На рис. 3 представлена графическая интерпретация средних значений экспериментального ис-

следования, выраженная в виде сплайнового графика плоскости залегания уровня грунтовых вод от земной поверхности. По оси «х» и «у» представлена плоскость, образуемая установленными измерительными скважинами, по оси «z» указаны средние значения показателей в сантиметрах уровня грунтовых вод от поверхности земли в исследуемый промежуток времени.



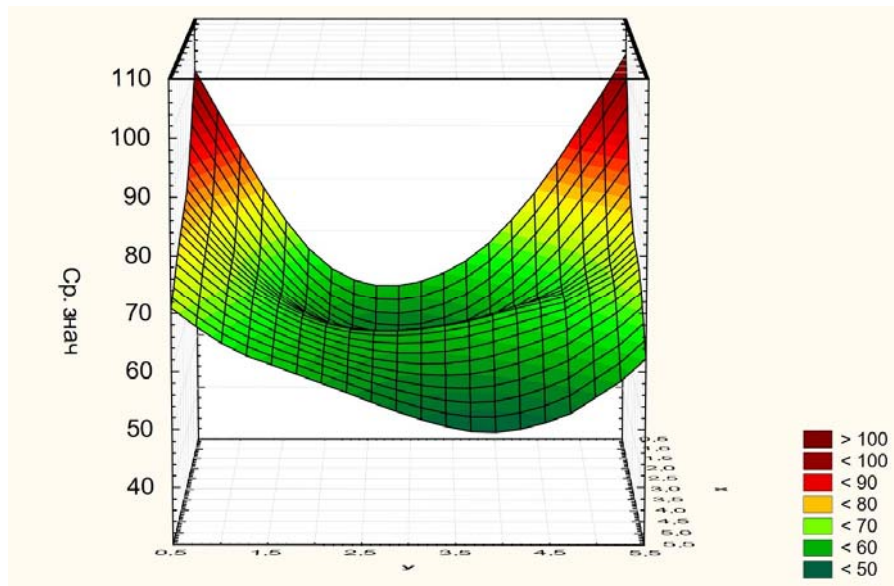


Рисунок 3. График плоскости залегания уровня грунтовых вод от земной поверхности

Figure 3. Graph of the plane of the groundwater level from the earth's surface

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Представленный график плоскости залегания грунтовых вод демонстрирует перепады усредненных значений в 48,5 см при минимальном расстоянии от поверхности в 41,6 см.

Рис. 4 отражает неравномерность залегания средних значений уровня залегания грунтовых вод измерительных скважин с представлением среднеквадратичного отклонения.

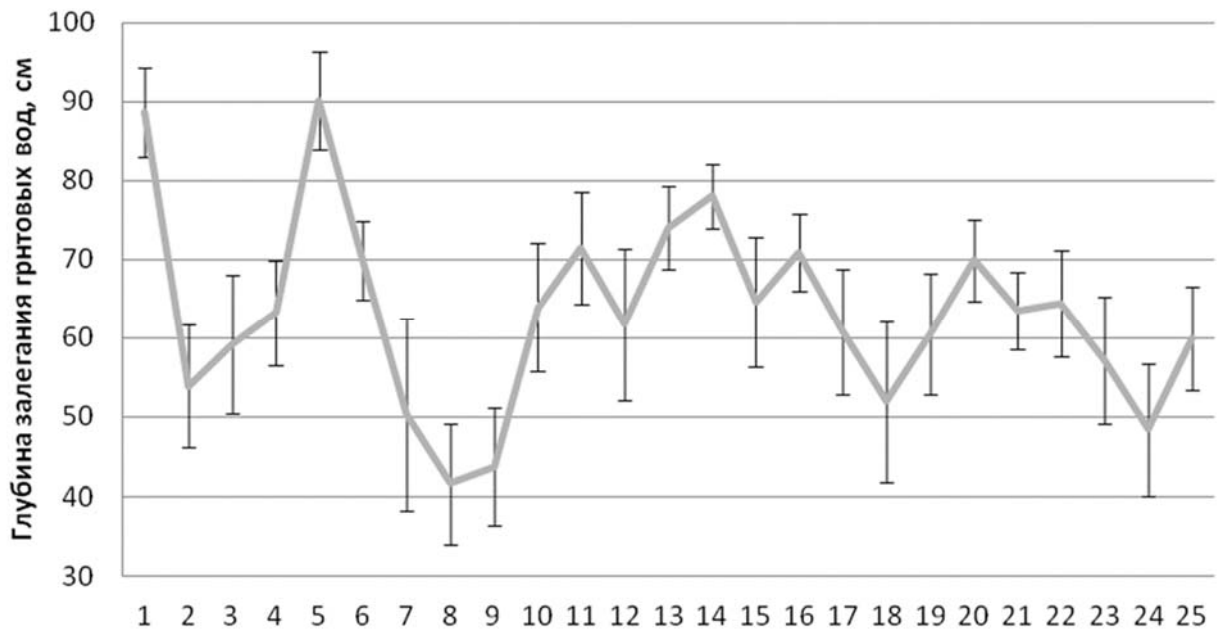


Рисунок 4. График глубины залегания уровня грунтовых вод от земной поверхности

Figure 4. Graph of the depth of the groundwater level from the earth's surface

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Исследование показало неравномерность залегания уровня грунтовых вод по отношению к месту разгрузки на примере северотаежного сосняка черничного. Полученные экспериментальным путем результаты возможно использовать для расчета наиболее эффективного расположения установок водопонижения при тушении лесных пожаров.

### Заключение

Таким образом, экспериментальным путем построена графическая модель уровня залегания почвенно-грунтовых вод и установлены сезонные колебания, подтверждающие неравномерность залегания по отношению к местам разгрузки. Однако

для расширения результатов необходимы более глубокие исследования взаимосвязи уровня грунтовых вод в совокупности с природно-климатическими условиями: температура и влажность окружающей среды, влажность поверхностного слоя почвы и т.п., а также с типом лесорастительных условий. Построенная модель глубины залегания почвенно-грунтовых вод дает возможность проведения дальнейшей серии испытаний иглофильтрационных вакуумных установок водопонижения в исследованном типе лесорастительных условий, направленной на исследование возможности применения таких установок при тушении лесных пожаров [4, 6, 9] в совокупности со средствами малой механизации [14, 15].

### Список литературы

1. Станкевич Т. С. Прогнозирование пространственного поведения лесного пожара при неопределенности и нестационарности процесса // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 1 (379). С. 20-34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44729444>.
2. Подрезов Ю. В. Основные направления предупреждения чрезвычайных лесопожарных ситуаций // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 2 (392). С. 172-182. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50793233>.
3. Иванов В. П., Марченко С. И., Нартов Д. И. Противопожарная профилактика лесных объектов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 3 (369). С. 43-54. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38239726>.
4. Лоренц А. С., Григорьев И. В., Григорьева О. И., Рябухин П. Б. Исследование применения иглофильтров в составе вакуумных установок для повышения эффективности борьбы с лесными пожарами // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 124-129. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54940793>.
5. Котельников Р. В., Мартынюк А. А. Математическая оценка достоверности информации о лесных пожарах // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 3 (393). С. 21-34. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53987617>.
6. Забоев И. А. Водопонижение при помощи иглофильтровых установок // Актуальные проблемы формирования и развития национальных инновационных систем : материалы международной научно-практической конференции. Институт управления и социально-экономического развития, Саратовский государственный технический университет. 2019. С. 46-48. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37094132>.
7. Ольгаренко В. И., Ольгаренко И. В., Семенов С. Я., Ольгаренко В. И. Формирование структуры влагообмена зоны аэрации орошаемого поля в условиях присутствия капиллярной каймы в толще грунта // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13. № 3. С. 1-16. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54331607>.
8. Волокитина А. В., Софронова Т. М., Корец М. А. Прогнозирование поведения пожаров растительности // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 1 (373). С. 9-25. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42446368>.
9. Применение иглофильтровых установок в Санкт-Петербурге / Ю. В. Волкова, А. И. Шкваров, Н. Р. Духопельникова, В. М. Рудевский // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербург, 19–24 ноября 2018 года. – Санкт-Петербург: Политех-пресс, 2018. – С. 136-138. URL: <https://elibrary.ru/yteipr>.

10. Обухов П. В., Юдина А. Ф. Виды и способы водопонижения грунтовых вод в строительстве // StudNet. 2022. Т. 5. № 6. С. 21. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49131556>.
11. Лоренц А. С., Пономарев К. А. Анализ пожароопасности в лесах архангельской области // Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года. Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС(Я) М. Е. Николаева (Николаевские чтения). 2022. С. 713-718. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50144686>.
12. Данилов В. С., Петросов М. Ю. Методы водопонижения котлованов в строительстве. Иглофильтровые установки // Студенческий вестник. 2023. № 47-10 (286). С. 29-31. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59689865>.
13. Бердникова Л. Н. Проблемы борьбы с пожарами в лесах севера // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2 (50). С. 164-168. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45845900>.
14. Мясищев Д. Г., Шостенко Д. Н. Обоснование структуры системы самоходного оборудования для тушения лесных пожаров. // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9. № 2 (34). С. 172-177. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38472870>.
15. Елисеев А. А., Тарасова В. А. Использование форвардера John Deere для тушения лесных пожаров // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2021. № 2 (88). С. 78-85. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46379816>.
16. Математическая модель определения оптимального месторасположения лесных пожарно-химических станций с учётом уровня развития транспортных сетей на территории лесного фонда / Р. Н. Ковалев, И. М. Еналеева-Бандура, А. Н. Баранов, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев // Resources and Technology. 2021. Т. 18. № 4. С. 77. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47433020>.
17. Комиссаров П. И. Применение аддитивных технологий для мониторинга уровня грунтовых вод в лесных массивах // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2023. Сборник материалов конференции: в 2-х томах. Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. 2023. С. 339-341. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54212879>.
18. Лоренц А. С., Лоренц А. В. Экологическая безопасность при эксплуатации иглофильтрационной установки для тушения лесных пожаров // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2023. Сборник материалов конференции: в 2-х томах. Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. 2023. С. 401-403. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54212896>.
19. Полвинен Д. А. Установки водопонижения, иглофильтры (эжекторы, легкие иглофильтры) // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2023. Сборник материалов конференции: в 2-х томах. Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. 2023. С. 570-574. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54212938>.
20. Лоренц А. С. Влияние бонитета на уровень грунтовых вод в лесном фитоценозе // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы Восьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2022. С. 103-104. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49563469>.
21. Rodríguez Silva F., Martínez J. R. M., Machuca M. Á. H., Leal J. M. R. VISUAL- SEVEIF, a Tool for Integrating the Behavior Simulation and Economic Evaluation of the Impacts of Wildfires. Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: Climate Change and Wildfires. General Technical Report 245. Albany, CA, USDA, 2013, pp. 163-178. DOI: 10.2737/PSW-GTR-245
22. Rothermel R. C. Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains. Research Paper INT-438. Ogden, UT, Intermountain Forest Experiment Station, 1991. 46 p. DOI: 10.2737/INT-RP-438
23. Safi Y., Bouroumi A. Prediction of Forest Fires Using Artificial Neural Networks. Applied Mathematical Sciences, 2013, vol. 7, no. 5-8, pp. 271-286. DOI: 10.12988/ams.2013.13025

24. Satir O., Berberoglu S., Donmez C. Mapping Regional Forest Fire Probability Using Artificial Neural Network Model in a Mediterranean Forest Ecosystem. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016, vol. 7, iss. 5, pp. 1645-1658. DOI: 10.1080/19475705.2015.1084541

25. Flannigan M. D., Krawchuk M. A., de Groot W. J., Wotton B. M., Gowman L. M. Implications of Changing Climate for Global Wildland Fire // *International Journal of Wildland Fire*. 2009. Vol. 18, no. 5. Pp. 483-507. DOI: 10.1071/WF08187 EDN: MXZUJP

### References

1. Forecasting the spatial behavior of a forest fire under uncertainty and nonstationarity of the process / Stankevich T.S. // *News of higher educational institutions. Forest magazine*. 2021. No. 1 (379). pp. 20-34.

2. Main directions for preventing forest fire emergencies / Podrezov Yu.V. // *News of higher educational institutions. Forest magazine*. 2023. No. 2 (392). pp. 172-182.

3. Fire prevention of forest objects / Ivanov V.P., Marchenko S.I., Nartov D.I. // *News of higher educational institutions. Forest magazine*. 2019. No. 3 (369). pp. 43-54.

4. Study of the use of wellpoint filters as part of vacuum installations to increase the efficiency of fighting forest fires / Lorenz A.S., Grigoriev I.V., Grigorieva O.I., Ryabukhin P.B. // *Systems. Methods. Technologies*. 2023. No. 4 (60). pp. 124-129.

5. Mathematical assessment of the reliability of information about forest fires / Kotelnikov R.V., Martynyuk A.A. // *News of higher educational institutions. Forest magazine*. 2023. No. 3 (393). pp. 21-34.

6. Water reduction using wellpoints / Zabojev I.A. // In the collection: *Current problems of the formation and development of national innovation systems. Materials of the international scientific and practical conference*. Institute of Management and Socio-Economic Development, Saratov State Technical University. 2019. pp. 46-48.

7. Formation of the moisture exchange structure of the aeration zone of an irrigated field in the presence of a capillary fringe in the soil / Olgarenko V.I., Olgarenko I.V., Semenenko S.Ya., Olgarenko V.I. // *Land reclamation and hydraulic engineering*. 2023. T. 13. No. 3. P. 1-16.

8. Forecasting the behavior of vegetation fires / Volokitina A.V., Sofronova T.M., Korets M.A. // *News of higher educational institutions. Forest magazine*. 2020. No. 1 (373). pp. 9-25.

9. Application of needle filter installations in St. Petersburg / Yu. V. Volkova, A. I. Shkvarov, N. R. Duhopelnikova, V. M. Rudevsky // *SPbPU Science Week: Materials of a scientific conference with international participation*. Institute of Civil Engineering, St. Petersburg, November 19–24, 2018. – St. Petersburg: Polytech-press, 2018. – P. 136-138.

10. Types and methods of reducing groundwater in construction / Obukhov P.V., Yudina A.F. // *StudNet*. 2022. T. 5. No. 6. P. 21.

11. Analysis of fire hazard in forests of the Arkhangelsk region / Lorenz A.S., Ponomarev K.A. // In the collection: *Strategy and prospects for the development of agricultural technologies and the forestry complex of Yakutia until 2050. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic and the 85th anniversary of the First President of the Republic of Sakha (Yakutia) M. E. Nikolaev (Nikolaev Readings)*. 2022. pp. 713-718.

12. Methods for reducing water in pits in construction. Wellpoint installations / Danilov V.S., Petrosov M.Yu. // *Student Bulletin*. 2023. No. 47-10 (286). pp. 29-31.

13. Problems of fighting fires in northern forests / Berdnikova L.N. // *Systems. Methods. Technologies*. 2021. No. 2 (50). pp. 164-168.

14. Justification of the structure of the system of self-propelled equipment for extinguishing forest fires. / Myasishchev D.G., Shostenko D.N. // *Forestry Journal*. 2019. T. 9. No. 2 (34). pp. 172-177.

15. Using a John Deere forwarder to extinguish forest fires / Eliseev A.A., Tarasova V.A. // Socio-economic and technical systems: research, design, optimization. 2021. No. 2 (88). pp. 78-85.
16. Mathematical model for determining the optimal location of forest fire-chemical stations taking into account the level of development of transport networks on the territory of the forest fund / Kovalev R.N., Enaleeva - Bandura I.M., Baranov A.N., Grigorieva O.I., Grigoriev I.V. // Resources and Technology. 2021. T. 18. No. 4. P. 77
17. Application of additive technologies for monitoring groundwater levels in forests / Komissarov P.I. // Lomonosov scientific readings for students, graduate students and young scientists - 2023. Collection of conference materials: in 2 volumes. North (Arctic) federal University named after M.V. Lomonosov. 2023. pp. 339-341.
18. Environmental safety during the operation of a needle filtration installation for extinguishing forest fires / Lorenz A.S., Lorenz A.V. // In the collection: Lomonosov scientific readings of students, graduate students and young scientists - 2023. Collection of conference materials: in 2 volumes. North (Arctic) federal University named after M.V. Lomonosov. 2023. pp. 401-403.
19. Water reduction units, wellpoints (ejectors, light wellpoints) / Polvinen D.A. // In the collection: Lomonosov scientific readings of students, graduate students and young scientists - 2023. Collection of conference materials: in 2 volumes. North (Arctic) federal University named after M.V. Lomonosov. 2023. pp. 570-574.
20. Influence of quality on the groundwater level in a forest phytocenosis / Lorenz A.S. // Increasing the efficiency of the forestry complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation. Petrozavodsk, 2022. pp. 103-104.
21. Rodríguez y Silva F., Martínez J.R.M., Machuca M.Á.H., Leal J.M.R. VISUAL- SEVEIF, a Tool for Integrating the Behavior Simulation and Economic Evaluation of the Impacts of Wildfires. Proceedings of the Fourth International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: Climate Change and Wildfires. General Technical Report 245. Albany, CA, USDA, 2013, pp. 163-178. DOI: 10.2737/PSW-GTR-245
22. Rothermel R.C. Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains. Research Paper INT-438. Ogden, UT, Intermountain Forest Experiment Station, 1991. 46 p. DOI: 10.2737/INT-RP-438
23. Safi Y., Bouroumi A. Prediction of Forest Fires Using Artificial Neural Networks. Applied Mathematical Sciences, 2013, vol. 7, no. 5-8, pp. 271-286. DOI: 10.12988/ams.2013.13025
24. Satir O., Berberoglu S., Donmez C. Mapping Regional Forest Fire Probability Using Artificial Neural Network Model in a Mediterranean Forest Ecosystem. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, vol. 7, iss. 5, pp. 1645-1658. DOI: 10.1080/19475705.2015.1084541
25. Flannigan M.D., Krawchuk M.A., de Groot W.J., Wotton B.M., Gowman L.M. Implications of Changing Climate for Global Wildland Fire // International Journal of Wildland Fire. 2009. Vol. 18, no. 5. Pp. 483-507. DOI: 10.1071/WF08187 EDN: MXZUJP

### Сведения об авторах

✉ *Лоренц Анатолий Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры инжиниринга транспортно-технологических средств и оборудования Высшей инженерной школы, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0906-8779>, e-mail: [a.lorents@narfu.ru](mailto:a.lorents@narfu.ru).

*Прохоров Алексей Владимирович* – старший преподаватель кафедры инжиниринга транспортно-технологических средств и оборудования Высшей инженерной школы, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0091-3988>, e-mail: [a.prohorov@narfu.ru](mailto:a.prohorov@narfu.ru).

*Григорьева Ольга Ивановна* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры Лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский

переулок, 5, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, e-mail: [grigoreva\\_o@list.ru](mailto:grigoreva_o@list.ru)

*Григорьев Игорь Владиславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Сергеляхское шоссе, 3 км., д. 3, г. Якутск, 677007, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru).

*Калита Георгий Александрович* – кандидат технических наук, доцент Высшей школы управления природными ресурсами ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», ул. Тихоокеанская, 136, г. Хабаровск, 680035, Российская Федерация, <http://orcid.org/0000-0003-3232-6841>, e-mail: [g.kalita@mail.ru](mailto:g.kalita@mail.ru).

*Морковин Владимир Александрович* – кандидат технических наук, доцент, и.о. зав. кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, e-mail: [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru).

### Information about the authors

✉ *Anatoly S. Lorentz* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering of Transport and Technological Means and Equipment of the Higher School of Engineering, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0906-8779>, e-mail: [a.lorents@narfu.ru](mailto:a.lorents@narfu.ru).

*Alexey V. Prokhorov* – senior lecturer at the Department of Engineering of Transport and Technological Facilities and Equipment of the Higher School of Engineering, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov”, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0091-3988>, e-mail: [a.prohorov@narfu.ru](mailto:a.prohorov@narfu.ru).

*Olga I. Grigoreva* – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Institutsky Lane, 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, e-mail: [grigoreva\\_o@list.ru](mailto:grigoreva_o@list.ru).

*Igor V. Grigorev* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forest Complex, Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoe Highway, 3 km., 3, Yakutsk, 677007, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: [silver73@inbox.ru](mailto:silver73@inbox.ru).

*Georgy A. Kalita* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Natural Resources Management, Pacific State University, Pacific str., 136, Khabarovsk, 680035, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-3232-6841>, e-mail: [g.kalita@mail.ru](mailto:g.kalita@mail.ru).

*Vladimir A. Morkovin* – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Acting Head of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-5822-2254>, email: [morkovin-vladimir@mail.ru](mailto:morkovin-vladimir@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/14>

УДК 630 : 629.11.02/098



## Имитационное моделирование резонансных явлений при работе рекуперативных гидравлических амортизаторов в подвесках прицепных звеньев лесовозных автопоездов

Вадим О. Никонов✉, 8888nike8888@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Валерий И. Посметьев, posmetyev@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Виктор В. Посметьев, victorvpo@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Владимир А. Зеликов, zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

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

В статье решается проблема повышения эффективности лесовозных автопоездов различного компонования при неустановившихся режимах движения в процессе вывозки ими лесоматериалов в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог. Опыт эксплуатации лесовозного автомобильного транспорта показывает, что большая часть энергии топлива расходуется им на тепловые потери, возникающие в его узлах и системах. Обоснована необходимость снижения потерь энергии в подвесках прицепных звеньев лесовозных автопоездов путем преобразования этой энергии, накопления и последующего полезного использования. С целью повышения эффективности лесовозных автопоездов предложены перспективные конструкции прицепных звеньев, оснащенных рекуперативными гидравлическими амортизаторами. Для оценки показателей эффективности работы предложенных прицепных звеньев в составе лесовозных автопоездов разработаны математические модели, учитывающие резонансные явления, происходящие при движении по опорной поверхности исследуемых лесовозных автопоездов. Проведение исследования осуществлялось с помощью разработанных компьютерных программ. Оснащение подвесок прицепных звеньев рекуперативными гидравлическими амортизаторами позволяет снизить амплитуду резонансных колебаний для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом с 87 см до 26 см, для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом-ропуском с 27 см до 20 см и для седельного лесовозного автопоезда с 46 см до 33 см. Генерируемая подвеской прицепных звеньев рекуперированная мощность составила для седельного лесовозного автопоезда – 7,8 кВт, для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом-ропуском – 9,1 кВт и для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом – 22,4 кВт. Оптимальное значение коэффициента демпфирования отдельного рекуперативного гидравлического амортизатора составило  $30 \text{ кН} \cdot \text{с/м}$ .

**Ключевые слова:** *имитационное моделирование, лесовозный автомобиль-тягач, прицепное звено, рекуперативный амортизатор, эффективность, лесовозная дорога, подвеска, резонансные колебания, амплитуда вертикальных колебаний, рекуперированная мощность, лесоматериалы*

**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:** Имитационное моделирование резонансных явлений при работе рекуперативных гидравлических амортизаторов в подвесках прицепных звеньев лесовозных автопоездов / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. В. Посметьев, В. А. Зеликов // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 239–259. – Библиогр.: с. 256–259 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/14>.

*Поступила* 02.05.2024. *Пересмотрена* 22.05.2024. *Принята* 23.05.2024. *Опубликована онлайн* 17.06.2024.

Article

## Simulation modeling of resonance phenomena during the operation of regenerative hydraulic shock absorbers in the suspensions of trailing links of timber road trains

Vadim O. Nikonov<sup>1</sup>✉, 8888nike8888@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Valerii I. Posmetev<sup>1</sup>, posmetyev@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Viktor V. Posmetev<sup>1</sup>, victorvpo@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Vladimir A. Zelikov<sup>1</sup>, zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

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

### Abstract

The article solves the problem of increasing the efficiency of timber truck trains of different configuration under unsteady driving modes in the process of timber transportation in the conditions of insufficiently equipped forest roads. The experience of operation of forest road transport shows that the most part of fuel energy is spent by it on heat losses arising in its units and systems. The necessity to reduce energy losses in suspensions of trailing links of forest road trains by means of transformation of this energy, accumulation and subsequent useful use is substantiated. In order to increase the efficiency of forest road trains the perspective designs of trailing links equipped with recuperative hydraulic shock absorbers are offered. To assess the performance of the proposed trailing links as part of timber truck trains, mathematical models have been developed that take into account the resonance phenomena occurring during the movement on the supporting surface of the studied timber truck trains. The research was carried out with the help of the developed computer programs. Equipping the suspensions of trailing links with regenerative hydraulic shock absorbers allows reducing the amplitude of resonance vibrations for a forestry tractor-trailer truck from 87 cm to 26 cm, for a forestry tractor-trailer truck from 27 cm to 20 cm and for a forestry truck-trailer combination from 46 cm to 33 cm. The recuperated power generated by the trailer link suspension was 7.8 kW for a truck-trailer combination, 9.1 kW for a forestry tractor-trailer combination, and 22.4 kW for a forestry tractor-trailer combination. The optimum value of the damping coefficient of an individual regenerative hydraulic shock absorber was 30 kN · s/m.

**Keywords:** *simulation modeling, timber hauling vehicle, trailer link, regenerative shock absorber, efficiency, timber road, suspension, resonant vibrations, vertical vibration amplitude, recovered power, timber*

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

**Acknowledgments:** author(s) thank(s) the reviewers for their contribution to the peer review.

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



**For citation:** Nikonov V. O., Posmetev V. I., Posmetev V. V., Zelikov V. A. (2024). Simulation modeling of resonance phenomena during the operation of regenerative hydraulic shock absorbers in the suspensions of trailing links of timber road trains. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, №. 2 (54), pp. 239-259 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/14>.

*Received* 02.05.2024. *Revised* 22.05.2024. *Accepted* 23.05.2024. *Published online* 17.06.2024.

### Введение

К наиболее трудоемкой операции процесса лесозаготовительного производства относится вывозка лесоматериалов. Более половины всего объема заготавливаемых лесоматериалов транспортируется с мест заготовки потребителям лесовозным автомобильным транспортом. В качестве подвижного состава используются лесовозные автопоезда различного компонования, целесообразность применения которых зависит от условий эксплуатации [1-3].

Системы подвесок являются ключевыми компонентами ходовой части прицепных звеньев лесовозных автопоездов, от характеристик которых зависит устойчивость, безопасность и комфортность при движении автопоезда. При осуществлении вывозки древесины по лесовозным дорогам низкого уровня обустроенности лесовозный автомобиль-тягач с прицепным звеном испытывают большие по количеству и величине вертикальные колебания. При определенных сочетаниях скорости движения лесовозного автопоезда, а также уровня обустроенности лесовозных дорог могут возникать резонансные явления, сопровождающиеся резким увеличением амплитуды вертикальных колебаний лесовозного автомобиля-тягача и прицепного звена. Несоввершенство подвески прицепного звена ухудшает плавность хода лесовозного автопоезда, способствует повышению вероятности появления резонансных явлений кузова и колес, снижает эффективность процесса вывозки древесины, увеличивает транспортные расходы, вызывает ускоренный износ агрегатов и систем автопоезда, приводит к более интенсивному разрушению опорной поверхности лесовозной дороги [4-6].

Опыт эксплуатации лесовозного автомобильного транспорта показывает, что большая часть энергии топлива расходуется им на тепловые потери, возникающие в его узлах и системах. На полезную же работу лесовозного автопоезда приходится

по разным оценкам лишь 15-20 % энергии топлива. Сократить расход топлива, и, следовательно, транспортные издержки, затрачиваемые на процесс транспортирования древесины, можно за счет снижения энергетических потерь в лесовозном автопоезде. Снизить резонансные колебания кузова прицепного звена и колес лесовозного автопоезда можно за счет добавления в подвеску демпфирующих и гасящих устройств [7, 8].

В последнее время актуальным направлением, позволяющим снизить потери энергии транспортными средствами, является не только повышение эффективности силовой передачи двигателя, но и рекуперация непродуцированной рассеиваемой тепловой энергии в подвеске. В этой связи отечественными и зарубежными исследователями в настоящее время ведутся разработки, посвященные повышению эффективности различных рекуперативных амортизаторов, используемых в подвесках транспортных средств. Результаты таких исследований приведены во множестве работ таких ученых [9-23].

Ли W. и др. (2023) [9] в своей работе с целью повышения устойчивости и безопасности транспортного средства при движении в сложных дорожных условиях предложили контроллер его ориентации в пространстве, существенно снижающий колебания движения кузова автомобиля, оснащенного последовательными активными подвесками. Активная система подвески обеспечивает управление положением кузова в соответствии с информацией о дорожных условиях для устранения возникающих раскачиваний и вибраций транспортного средства. Несмотря на это проблема высокого энергопотребления и низкой надежности активных подвесок все еще ограничивает их использование. Для исследования устойчивости транспортного средства, оснащенного активными подвесками, при неустановившихся режимах движения в сложных дорожных условиях разработана модель объекта исследования,

с помощью которой выполнен анализ кинематики и динамики движения транспортного средства. Учитывая удары, синусоидальные и случайные дорожные возмущения, предлагаемый контроллер ориентации позволяет уменьшить угловые движения и ускорения транспортного средства на 46 % и 24 % соответственно.

Zhou R. и др. (2023) [10] в своей статье описали предложенную ими компактную конструкцию рекуперативной магнитной подвески, обладающую простотой и удобством в техническом обслуживании и ремонте. Исследование влияния коэффициента электромеханической связи и сопротивления внешней нагрузки на динамические характеристики предлагаемой подвески, позволило установить, что по сравнению с пассивной подвеской, предлагаемая подвеска позволяет более эффективно снижать динамические нагрузки при ударах и периодических возбуждениях. Колебания подвески и относительные динамические нагрузки на шины уменьшаются соответственно на 39,45 % и 41,18 % при периодической частоте 3,3 Гц. Сопротивление внешней нагрузки предлагаемого рекуперативного амортизатора можно использовать для реализации переменного демпфирования системы подвески и снижения воздействия вибрации на резонансной частоте.

Kim Y.-J. и др. (2024) [11] в своем исследовании рассмотрели вопрос влияния изменения неподрессоренной массы при увеличении веса агрегатов полноприводного автомобиля на резонансные явления, протекающие в подвеске автомобиля, и, сопровождающиеся ухудшением комфорта езды, а также снижением устойчивости. Предложен оптимальный регулятор переключения с полуактивным магнитореологическим демпфером. Выполнено компьютерное моделирование, позволившее оценить эффективность изменения комфортности и устойчивости движения на различных по уровню обустроенности типах дорог. Установлено, что резонансная частота поддрессоренной массы при 1 Гц практически одинакова у обычных и полноприводных автомобилей. Однако значительная разница возникает вблизи резонансной частоты неподрессоренной массы. Это связано с тем, что вес неподрессоренной массы увеличивается, и, следовательно,

значение резонансной частоты для неподрессоренной массы уменьшается. Кроме этого, выявлено, что резонанс колес может возникнуть из-за критических скоростей вращения валов автомобиля и пространственной частоты профиля дороги. При уменьшении величины резонансной частоты неподрессоренной массы возрастает вероятность резонанса колес из-за профиля дороги.

Kou F. и др. (2018) [12] в своей работе с целью согласования характеристик демпфирования и рекуперации энергии энергорегенеративной подвески предложили конструкцию полуактивной рекуперативной подвески транспортного средства с электрогидравлическим приводом. Установлено, что при подаче синусоидального сигнала с частотой 2 Гц и амплитудой 30 мм, значение квадрата ускорения пружины оптимизированной полуактивной регенеративной подвески снижается на 22,23 %, а среднеквадратичное значение рекуперированной мощности повышается на 40,54 %. Это обеспечивает удовлетворение требований комфорта езды и безопасности движения.

Krauze P. и Kasprzyk J. (2020) [13] в своей статье исследовали работу управляемого магнитореологического демпфера подвески транспортного средства при его движении в условиях недостаточно обустроенных дорог. Разработана модель транспортного средства, описывающая изменение его основных характеристик при различных неустановившихся режимах движения. Предлагаемая модель имеет семь степеней свободы, описывающих продольное движение транспортного средства, его вертикальные и угловые колебания, а также вращательное и вертикальное движение колес. Предложена методология, связанная с безопасностью движения транспортного средства и основанная на комплексном анализе характеристик проводимости, спектральной плотности, мощности, а также показателей сцепления с дорогой и управляемости транспортного средства.

Lukosevicius V. и др. (2021) [14] в своей работе выполнили оценку параметров устойчивости автомобиля на основе моделирования заданных режимов движения при взаимодействии колес автомобиля с дорогой. Предложена классификация подве-

сок транспортных средств по обобщенным кинематическим свойствам подвески, обеспечивающая предпосылки для разработки универсальных моделей, учитывающих работу подвесок с разнообразными кинематическими свойствами. Разработаны модели, предусматривающие влияние подвески на устойчивость движения автомобиля. Установлено, что изменение работы автомобиля при повышении скорости движения связано не только с эффектом пробуксовки, но и с изменением пространственного положения колес из-за кинематики подвески и несовместимости ее с рулевым управлением.

Han S.-Y. и Liang T. (2022) [15] в своем исследовании предложили стратегию контроля колебаний полуактивной подвески автомобиля. Ее использование дает возможность выполнять динамическую регулировку автомобиля относительно опорной поверхности в зависимости от уровня обустроенности дороги, улучшить комфортность и безопасность при движении. Разработана модель полуактивной подвески автомобиля, выполнено численное моделирование движения транспортного средства по дорогам различного уровня обустроенности. Установлено, что ускорения кузова автомобиля, оснащенного предлагаемой подвеской, при движении по неровностям дороги снизились на 46,93 %. Предложенная стратегия контроля позволяет улучшить характеристики автомобиля с большей эффективностью, чем пассивная подвеска с нечетким управлением.

Guo S. и др. (2023) [16] в своей статье исследовали работу гидравлической интегрированной взаимосвязанной регенеративной подвески, позволяющей одновременно генерировать энергию и улучшать динамику движения автомобиля. Входными параметрами являлись: внутренний диаметр гидроцилиндра, объем гидравлического двигателя, начальное давление в системе, параметры пневмогидроаккумулятора. Критериями эффективности, являлись: комфортность, устойчивость движения, а также среднее значение мощности генерируемой энергии. По сравнению с оптимизированными традиционной подвеской и подвеской со стабилизатором поперечной устойчивости, комфортность движения автомобиля, оснащенного предлагаемой под-

веской улучшена на 22,58 % и 18,41 % соответственно, устойчивость увеличена на 19,46 % и 17,91 %. Максимальная рекуперлируемая мощность достигает не менее 255,1 Вт, комфортность и устойчивость движения улучшаются на 7,35 % и 11,25 % соответственно по сравнению с оптимизированными традиционными конструкциями подвесок автомобилей.

Lv X. и др. (2020) [17] в своей работе рассмотрели особенности и преимущества использования рекуперативной гидравлической подвески. Разработана общая конструктивная схема рекуперативной гидравлической подвески, математическая модель, описывающая работу такой подвески. Выполнен анализ влияния параметров автомобиля на эффективность генерирования подвесочной энергии рабочей жидкости. Осуществлена оценка динамических характеристик гидравлического амортизатора. Установлено, что неровности дороги, жесткость шин и скорость движения автомобиля оказывают большее влияние на эффективность процесса рекуперации энергии, в сравнении с влиянием силы демпфирования, жесткости амортизатора и массы колеса. При движении автомобиля со скоростью 60 км/ч, значение рекуперлируемой мощности изменяется в диапазоне от 100 до 400 Вт. Практическое использование рассматриваемой подвески дает возможность улучшить коэффициент использования энергии транспортного средства. Выявлено, что с повышением температуры рабочей жидкости, демпфирующая сила уменьшается, и, как следствие изменяется рекуперлируемая мощность. Демпфирующая сила может быть увеличена за счет повышения амплитуды вибрации при фиксированной угловой скорости или за счет ускорения частоты возбуждения при той же амплитуде вибрации.

Gijon-Rivera C. и Olazagoitia J. L. (2020) [18] в своем исследовании проанализировали различные существующие технологии рекуперации энергии амортизаторами подвесок автомобилей. Предложена методика, позволяющая сравнивать эффективность оцениваемых технологий рекуперации энергии в подвесках автомобилей при их проектировании. Выбор рабочих параметров рекуперативных подвесок основывался на оценке влияния наиболее

значимых факторов, на коэффициент демпфирования. Такими факторами, изменяемыми при моделировании являются режимы движения автомобиля и уровень обустроенности дорог. Определение оптимальных рабочих параметров рекуперативной подвески позволило упростить ее конструкцию, снизить массу, и в конечном итоге сократить транспортные расходы.

Chen L. и др. (2021) [19] в своей статье предложили новую гидравлическую подвеску, позволяющую рекуперировать энергию рабочей жидкости, а также улучшить динамические характеристики автомобиля. Разработана математическая модель функционирования предлагаемой подвески, включающая в себя механическую и гидравлическую подсистемы. Проведен анализ свободных и вынужденных колебаний предлагаемой подвески в сравнении с традиционной конструкцией подвески. Установлено, что при движении транспортных средств, оснащенных новой гидравлической и традиционной подвесками со скоростью 72 км/ч, среднеквадратическое ускорение динамического отклика от неровностей дороги для транспортного средства с традиционной подвеской на 64,91 % выше, чем для транспортного средства с новой гидравлической подвеской. Величина рекуперированной мощности предлагаемой гидравлической подвеской при скорости движения транспортного средства 36 км/ч составляет 186,93 Вт, а при скорости 108 км/ч – 656,9 Вт. При движении транспортных средств с одинаковой скоростью по дороге аналогичного уровня обустроенности, предлагаемая гидравлическая подвеска обеспечивает большую жесткость, особенно при крене автомобиля, поскольку собственная частота крена гидравлической подвески выше, чем у традиционной подвески.

Guntur H. L. и др. (2020) [20] в своей работе рассмотрели метод проектирования гидромагнитно-электрического рекуперативного амортизатора, использование которого позволяет достичь характеристик, близких к традиционным амортизаторам, обеспечить комфортность при движении и максимальное значение рекуперированной мощности. Установлено, что конструктивные параметры гидроцилиндров оказывают существенное влияние на изменение демпфирующих сил, а также на генерируемую

энергию подвеской. Предлагаемый рекуперативный амортизатор для обеспечения оптимальных характеристик сочетает в себе три типа демпфирования (вязкостное, сухое трение и электрическое демпфирование). Математическое моделирование и экспериментальное исследование позволило установить, что максимальное значение генерируемой рекуперативными амортизаторами мощности изменяется от 7 до 14 Вт при периодической входной частоте 1 и 1,5 Гц соответственно.

Krauze P. (2023) [21] в своем исследовании обосновал актуальность разработки управляемых систем подвески транспортных средств, способных в реальном режиме времени адаптироваться к изменяющимся дорожным условиям. Представлен метод идентификации путей сигналов управления полуактивной подвеской с магнитореологическими амортизаторами. Полученные зависимости описывают влияние сил, создаваемых амортизаторами передней подвески, на ускорение изменяемое в средней передней части кузова автомобиля. Результаты идентификации, оцененные в частотной области, выявили несколько резонансов реакции автомобиля, связанных с подвеской и колесами, а также их зависимость от выбранных конструкций амортизаторов и управляющих токов. Полученные модели полуактивной подвески, связанные с управлением, могут быть интегрированы в алгоритм адаптивного управления подвеской.

Huang J. и др. (2020) [22] в своей статье исследовали магнитореологическую регенеративную систему подвески, адаптируемую к различным условиям движения и позволяющую обеспечить требуемые комплексные характеристики подвески, преобразовывать и полезно использовать потенциальную энергию колебаний. Результаты показывают, что использование предлагаемых магнитореологических рекуперативных амортизаторов не меняет собственной резонансной частоты системы подвески, что обеспечивает комфортность при движении и устойчивость управления транспортным средством. Установлено, что значение мгновенной выходной мощности на частоте 1,5 Гц при гармоническом возбуждении достигает 500 Вт. С увеличением частоты и высоты неровностей дороги рекуперированная мощность значительно повышается.

Yaghoubi S. и Ghanbarzadeh A. (2024) [23] в своей статье провели на основе моделирования в программном продукте MATLAB / Simulink оптимизацию параметров системы подвески с целью снижения колебаний автомобиля при неустановившихся режимах движения. Для оптимизации переменных системы подвески использовался алгоритм оптимизации роя частиц. Результаты показали, что добавление магнитоэологических амортизаторов в любом режиме движения снижает колебания автомобиля. Максимальное снижение колебаний автомобиля достигалось при оптимальных параметрах подвески автомобиля, величина целевой функции в этом состоянии была улучшена на 32 %.

Анализ приведенных научных работ позволил установить, что все они направлены на: повышение безопасности движения транспортного средства; улучшение комфортности и устойчивости при движении автомобиля; увеличение мощности генерируемой энергии подвеской; уменьшение вибраций и колебаний; упрощение конструкции подвески; повышение демпфирующей силы подвески; снижение транспортных расходов; сведение к минимуму динамических нагрузок и резонансных явлений; сокращение расхода топлива; оптимизацию рабочих и конструктивных параметров подвески; уменьшение массы и габаритных размеров подвески; обеспечение удобства в техническом обслуживании и ремонте.

Проведенный анализ статей позволил установить, что реализация перечисленных показателей может достигаться за счет разработки и исследования: рекуперативных гидравлической и электрогидравлической интегрированных взаимосвязанных подвесок; активных подвесок транспортных средств; магнитных демпферов с энергосберегающим эффектом; контроллеров ориентации за движением кузова автомобиля; регуляторов переключения

для полуактивных магнитоэологических амортизаторов; управляемых систем подвески транспортных средств, позволяющих в реальном режиме времени адаптироваться к изменяющимся дорожным условиям.

Результаты исследований, выполненные авторами статьи, позволили предложить конструкции прицепных звеньев лесовозных автопоездов, подвески которых оснащены рекуперативными гидравлическими амортизаторами (рис. 1). Работа таких подвесок прицепных звеньев основана на преобразовании, накоплении и использовании энергии колебаний при переходных режимах движения лесовозного автопоезда. Оснащение прицепных звеньев такими рекуперативными гидравлическими амортизаторами дает возможность не только генерировать энергию рабочей жидкости, но и подавлять резонансные колебания.

Целью работы, является оценка эффективности рекуперативных гидравлических амортизаторов, установленных в подвесках прицепных звеньев лесовозных автопоездов на предмет снижения амплитуды резонансных вертикальных колебаний его звеньев и характер изменения рекуперированной мощности.

Цель работы достигается за счет: разработки математических моделей, учитывающих резонансные явления, происходящие при движении по опорной поверхности рассматриваемых лесовозных автопоездов; разработки трех компьютерных программ, позволяющих исследовать изменение амплитуды вертикальных колебаний прицепных звеньев автопоезда; оценки эффективности системы рекуперации энергии рекуперативными гидравлическими амортизаторами подвески.

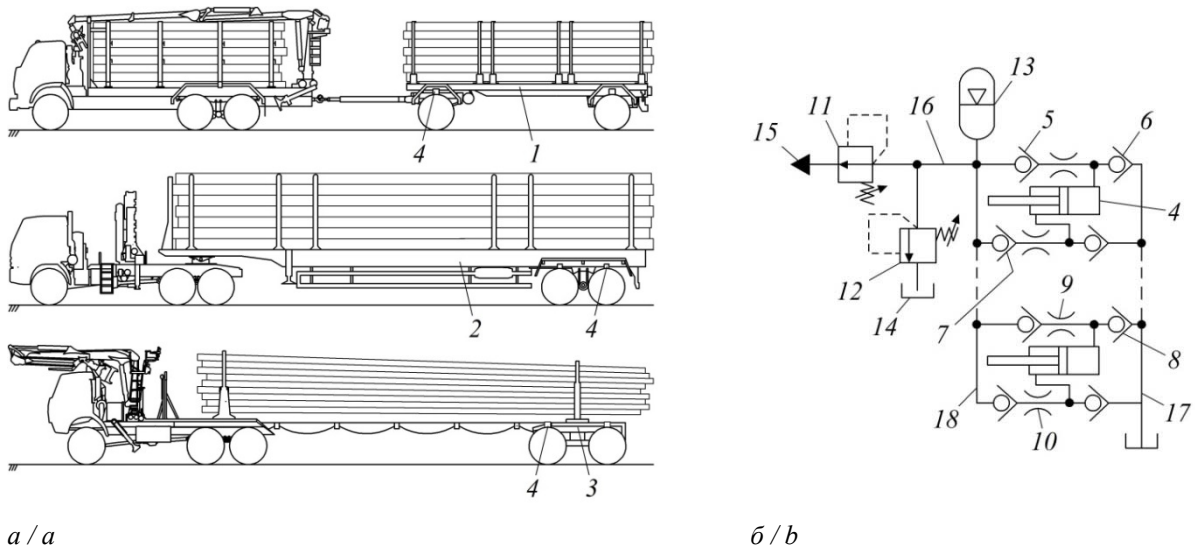


Рисунок 1. Схемы лесовозных автомобилей-тягачей с прицепными звеньями, оснащенными рекуперативными амортизаторами – а и гидропривод, управляющий работой рекуперативных гидравлических амортизаторов – б; 1-3 – прицепные звенья лесовозных автопоездов; 4 – гидравлические амортизаторы; 5-8 – обратные клапаны; 9, 10 – дроссели; 11, 12 – редукционный и предохранительный клапаны; 13 – пневмогидравлический аккумулятор; 14 – гидробак; 15 – порт подачи рабочей жидкости потребителю; 16-18 – соединительные трубопроводы

Figure 1. Schemes of forest tractor-trailers with trailing links equipped with regenerative shock absorbers – a and hydraulic drive controlling the operation of regenerative hydraulic shock absorbers – b; 1-3 – trailing links of forest trains; 4 – hydraulic shock absorbers; 5-8 – check valves; 9, 10 – throttles; 11, 12 – reducing and safety valves; 13 – pneumohydraulic accumulator; 14 – hydraulic tank; 15 – port for supplying working fluid to the consumer; 16-18 – connecting pipelines

Источник: собственная схема авторов  
Source: authors' own scheme

### Материалы и методы

#### Предмет и объект исследования

Объектом исследования в данной работе являются процессы рекуперации энергии рекуперативными гидравлическими амортизаторами, а также резонансные режимы вертикальных колебаний, возникающие в прицепных звеньев лесовозных автопоездов.

В качестве предмета исследования выступают закономерности изменения параметров рекуперативных гидравлических амортизаторов и амплитудно-частотных характеристик от времени, частоты воздействия со стороны опорной поверхности, а также от коэффициента демпфирования.

#### Дизайн эксперимента и сбор данных

Для моделирования изменения амплитуды резонансных колебаний прицепных звеньев, рас-

считываемых лесовозных автопоездов использовались методы классической механики. В рамках математической модели лесовозные автопоезда представлялись совокупностью перемещающихся в трехмерном пространстве отдельных тел, соединенных между собой, с подвеской, колесами и опорной поверхностью лесовозной дороги с заданными параметрами уровня обустроенности. При исследовании различных по компонованию лесовозных автопоездов принимались следующие допущения: автопоезд состоял из трехосного лесовозного автомобиля-тягача и двухосного прицепного звена; масса вывозимых лесоматериалов рассматриваемыми автопоездами была принята одинаковой и составляла 20 т; масса лесовозных автомобилей-тягачей для всех трех схем компонования составляла 7,5 т.

Расчетные схемы, по которым выполнялось построение математических моделей для лесовозных автопоездов рассматриваемого компонования, приведены на рис. 2. Представление в математических моделях рассматриваемых лесовозных автопоездов, аналогично описаниям, приведенным в ранее опубликованных работах авторов [4-8].

Для описания возмущающегося воздействия лесовозной дороги на прицепные звенья лесовозного автопоезда использовалась упруго-вязкая модель колеса. Ее главной особенностью является упрощение рассматриваемой системы «опорная поверхность – колесо – подвеска» до более простой, описываемой коэффициентами жесткости и демпфирования.

Сила, действующая со стороны колеса на раму прицепного звена лесовозного автопоезда, рассчитывалась по следующей формуле:

$$F_i^z = c_i (z_{\text{surf},i}(x_i, y_i) + R_{\text{wh},i} - z_{\text{wh},i}) - d_i \left( \frac{\partial z_{\text{surf},i}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{\text{wh},i}}{\partial t} \right), \quad (1)$$

где  $i$  – порядковый номер колеса;  $z_{\text{surf},i}(x, y)$  – вертикальная координата опорной поверхности лесовозной дороги под колесом, равная координате нижней точки колеса;  $z_{\text{wh},i}$  – вертикальная координата точки крепления колеса к лесовозному автопоезду;  $R_{\text{wh},i}$  – радиус колеса;  $c_i$ ,  $d_i$  – коэффициенты жесткости и демпфирования.

Для создания резонансных режимов движения лесовозного автопоезда необходимо было обеспечить в модели близость частот вынуждающей силы со стороны опорной поверхности лесовозной дороги и собственных колебаний прицепного звена. Для создания периодических возмущающих воздействий опорная

поверхность лесовозной дороги имела синусоидальный профиль  $z(x, y)$  с заданным периодом  $L$  следования синусоидальных выступов и впадин:

$$z(x, y) = h_{\text{road}} \sin \left( 2\pi f \frac{x}{v} \right) = h_{\text{road}} \sin \left( 2\pi \frac{x}{L} \right), \quad (2)$$

где  $h_{\text{road}}$  – амплитуда синусоидальных колебаний опорной поверхности лесовозной дороги;  $f$  – частота вынуждающих колебаний, действующих на раму прицепного звена лесовозного автопоезда со стороны колес;  $v$  – скорость движения лесовозного автопоезда в направлении  $x$  (в большинстве компьютерных экспериментов скорость составляла 20 км/ч). Если лесовозный автопоезд движется с заданной скоростью  $v$ , частота вынуждающих колебаний рассчитывается по формуле  $f = v/L$ .

Функционирование рекуперативных гидравлических амортизаторов моделировалось косвенным образом, путем увеличения коэффициентов демпфирования подвески  $d_i$  прицепного звена автопоезда. Для многих конструкций рекуперативных гидравлических амортизаторов основной эффект оказывается линейным относительно скорости движения оси колеса лесовозного автопоезда относительно рамы, поэтому коэффициент демпфирования в математических моделях представлялся в виде суммы коэффициента демпфирования без рекуперативных гидравлических амортизаторов  $d_{i0}$  и дополнительного коэффициента демпфирования, обеспечиваемого рекуперативным амортизатором  $d_{iP}$ :

$$d_i = d_{i0} + d_{iP}. \quad (3)$$

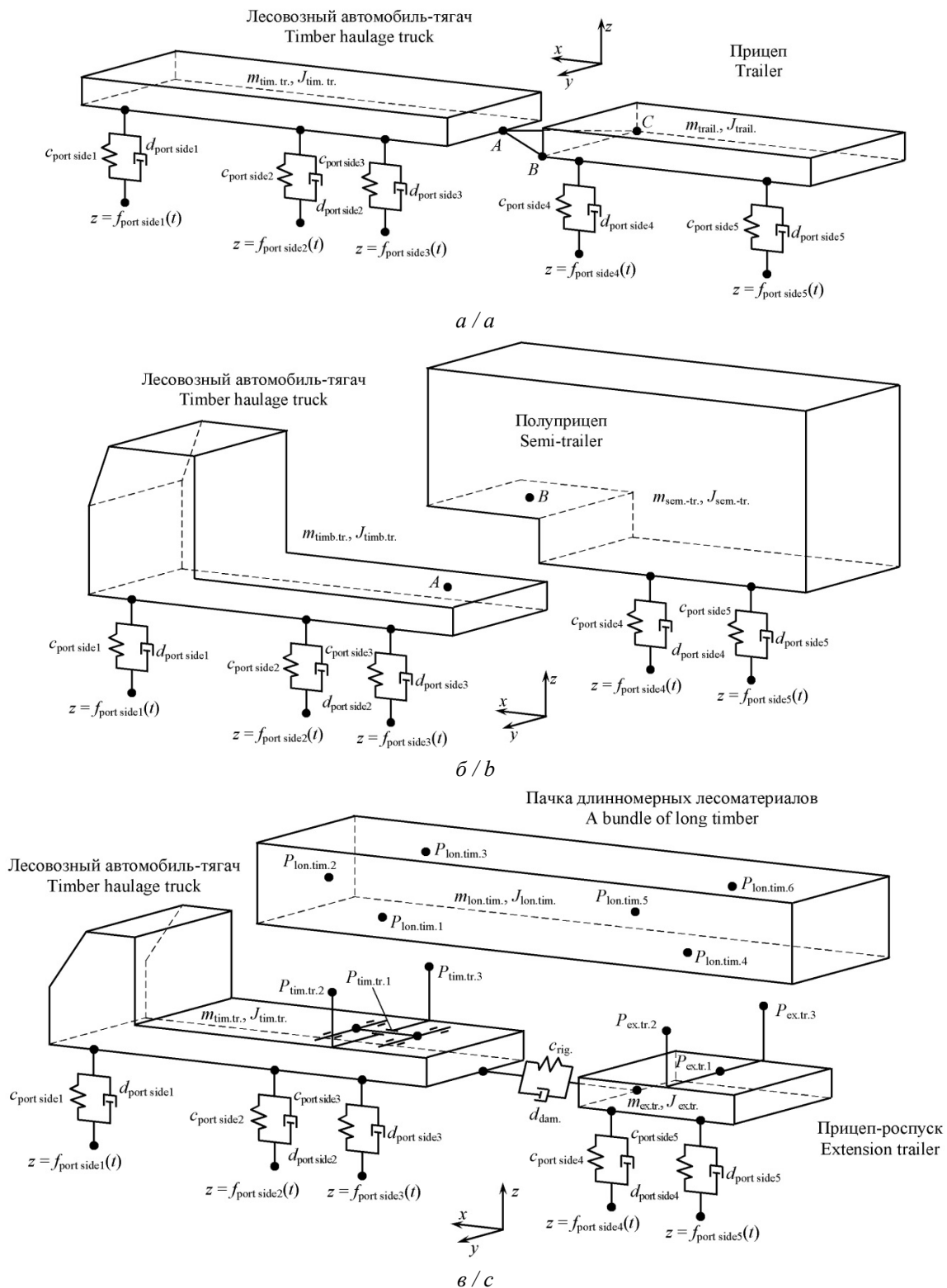


Рисунок 2. Расчетные схемы для построения математических моделей: а-в – лесовозные автопоезда рассматриваемого компонента

Figure 2. Calculation schemes for building mathematical models: a-c – timber haulers road trains of the considered configuration

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme



Для колес прицепного звена лесовозного автопоезда базовый коэффициент демпфирования был принят 8 кН·с/м, коэффициент демпфирования рекуперативных гидравлических амортизаторов 20 кН·с/м.

Такое представление рекуперативных гидравлических амортизаторов позволяет, с одной стороны, отобрать энергию колебаний рамы прицепного звена, а с другой стороны, рассматривать эту энергию как генерируемую такими амортизаторами. При этом мгновенная рекуперированная мощность  $N_{recov.ins}$  рассчитывается по формуле

$$N_{recov.ins} = \sum_{i=1}^{n_{wh.}} d_{iP} \left( \frac{\partial z_{surf.i}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{wh.i}}{\partial t} \right)^2, \quad (4)$$

где  $i$  – номер колеса и соответствующей подвески, в которой установлен рекуперативный амортизатор;  $n_{wh.}$  – количество колес и соответствующих подвесок, в которых установлены рекуперативные амортизаторы.

При исследовании далее резонансных явлений и эффективности системы рекуперации используются следующие показатели: амплитуда вертикальных колебаний прицепного звена  $A_z$  и среднее значение рекуперированной мощности  $N_{recov.}$

Амплитуда вертикальных колебаний прицепного звена  $A_z$  определялась следующим образом:

$$A_z = \max_{\tau_1 < \tau < \tau_2} z_{trail,\tau} - \min_{\tau_1 < \tau < \tau_2} z_{trail,\tau}, \quad (5)$$

где  $\tau$  – номер шага интегрирования по времени;  $z_{trail,\tau}$  – вертикальная координата центра тяжести прицепного звена автопоезда;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – номера шагов интегрирования в пределах, которых выполняется измерение амплитуды вертикальных колебаний.

Шаг  $\tau_1$  соответствовал времени 10 с и определялся от начального момента выполнения эксперимента в компьютерной программе. К этому времени модельный лесовозный автопоезд приходил в состояние динамического равновесия. Шаг  $\tau_2$  соответствовал времени 16 с, что позволяло за 6 с воспроизвести несколько вертикальных колебаний прицепного звена и определить минимальную и максимальную высоту положения центра тяжести.

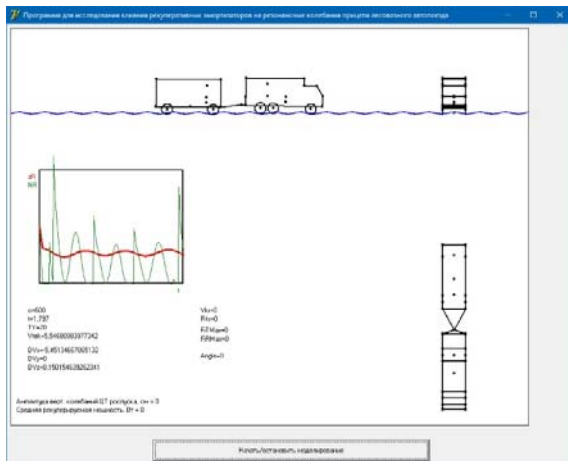
Средняя мощность  $N_{recov.}$ , генерируемая рекуперативными гидравлическими амортизаторами подвесок прицепного звена определялась путем усреднения мгновенной мощности

$$N_{recov.} = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} N_{recov.ins}(\tau). \quad (6)$$

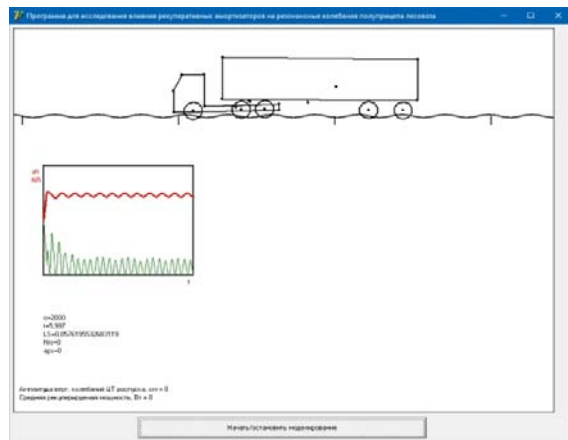
При дальнейшем обсуждении благоприятными режимами являются такие режимы движения, в которых амплитуда вертикальных колебаний  $A_z$  минимальна и рекуперированная мощность  $N_{recov.}$  максимальна.

Для исследования резонансных явлений, проявляющихся при движении лесовозных автопоездов рассматриваемого компонования, разработаны три компьютерные программы, интерфейсные формы которых приведены на рис. 3. Такие программы позволяют моделировать движение лесовозных автопоездов по синусоидальной опорной поверхности с заданными параметрами неровностей, а также оценивать эффективность рекуперированной энергии амортизаторами прицепных звеньев и снижение амплитуды их вертикальных колебаний.

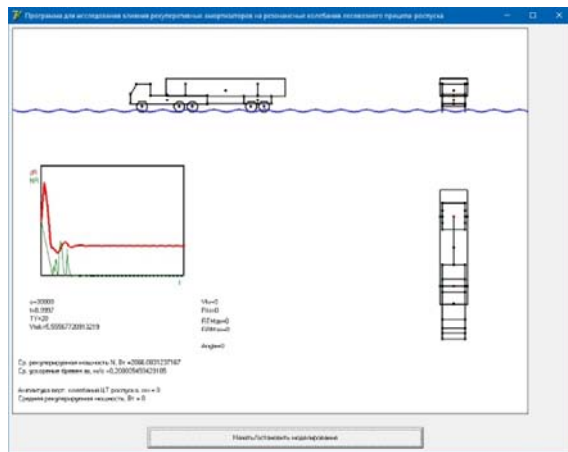
Проведение теоретического исследования было основано на выполнении серии компьютерных экспериментов, при которых последовательно изменяли входные параметры модели (в частности период  $L$  синусоидального профиля опорной поверхности). При выполнении каждого компьютерного эксперимента задавали период  $L$  синусоидального профиля опорной поверхности, который соответствовал заданной частоте вынуждающей силы  $f$  при рассматриваемой скорости  $v$  движения лесовозного автомобиля-тягача с прицепным звеном.



a / a



б / б



в / в

Рисунок 3. Интерфейсные формы вывода результатов компьютерных экспериментов

Figure 3. Interface output forms results of computer experiments

Источник: собственная схема авторов  
Source: authors' own scheme

В начальный момент времени проведения компьютерного эксперимента лесовозный автомобиль-тягач и прицепное звено размещались на высоте 1,5 м над опорной моделируемой поверхностью лесовозной дороги. Продольная скорость  $v$  движения лесовозного автопоезда в течение всего компьютерного эксперимента выдерживалась постоянной.

В первые секунды после начала компьютерных экспериментов, лесовозный автомобиль-тягач с прицепным звеном опускался на опорную поверхность, автопоезд совершал затухающие колебания и приходил в состояние динамического равновесия. После лесовозный автопоезд совершал периодические вертикальные колебания в зависимости от характеристик опорной поверхности синусоидального профиля. Далее в интервале времени от 10 до 16 с осуществлялось наблюдение за модельным лесовозным автомобилем-тягачом с прицепным звеном, а также расчет показателей эффективности  $A_z$  и  $N_{recov}$ .

Анализ резонансных явлений проводился с помощью амплитудно-частотных характеристик колебаний, в частности зависимостей амплитуды  $A_z$  колебаний от частоты  $f$  вертикальных колебаний. Для получения каждого спектра было выполнено по 37 компьютерных экспериментов с изменяемыми периодами синусоидального рельефа опорной поверхности, соответствующими необходимым значениям частот  $f$  вертикальных колебаний. Во всех компьютерных экспериментах горизонтальная скорость лесовозного автомобиля-тягача с прицепным звеном была постоянной – 20 км/ч. При этом, компьютерные эксперименты проводились, как для случая отсутствия рекуперативных амортизаторов в подвесках прицепных звеньев (рис. 4), так и для случая оснащения подвесок прицепных звеньев рекуперативными амортизаторами (рис. 5).

## Результаты

При небольших значениях частот  $f$  амплитуда вертикальных колебаний на всех амплитудно-частотных характеристиках составляет 20 см, так как из-за большой протяженности соответствующих частотам 0,1-0,3 Гц синусоидальных неровностей опорной поверхности движение центра тяжести прицепного звена автопоезда практически копирует профиль опорной поверхности лесовозной

дороги (рис. 4, *a* и рис. 5, *a*). В области высоких частот от 5 до 6 Гц протяженность неровностей опорной поверхности мала и достигает порядка 0,5 м, что меньше диаметра колеса, поэтому такие высокочастотные колебания поглощаются рекуперативными гидравлическими амортизаторами подвески и центр тяжести прицепного звена практически не колеблется (в рассматриваемом случае амплитуда колебаний изменяется от 3 до 6 см). Если в отсутствии резонанса амплитуда колебаний прицепа не превышает 20 см, то в резонансных режимах амплитуда колебаний может достигать 87 см для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом (рис. 4, *a* и рис. 5, *a*), 46 см для лесовозного тягача с полуприцепом (рис. 4, *b* и рис. 5, *b*), 27 см для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом-ропуском (рис. 4, *в* и рис. 5, *в*).

Резонансный пик явно выражен для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом при значении частоты вынуждающей силы, равной 1,2 Гц, для седельного лесовозного автопоезда – 0,8 Гц и для тягача с прицепом-ропуском – 0,9 Гц.

Необходимо отметить существенное отличие колебаний рассматриваемых прицепных звеньев лесовозных автопоездов. По причине того, что оси прицепа лесовозного автопоезда разнесены на расстояние 6 м (для двух других прицепных звеньев автопоезда оси расположены рядом), вертикальная вынуждающая сила может действовать как в одной фазе, так и в противофазе, а также с промежуточными сдвигами фаз. Из-за этого могут происходить разные виды колебаний от вертикального колебания прицепа без наклона до колебания угла

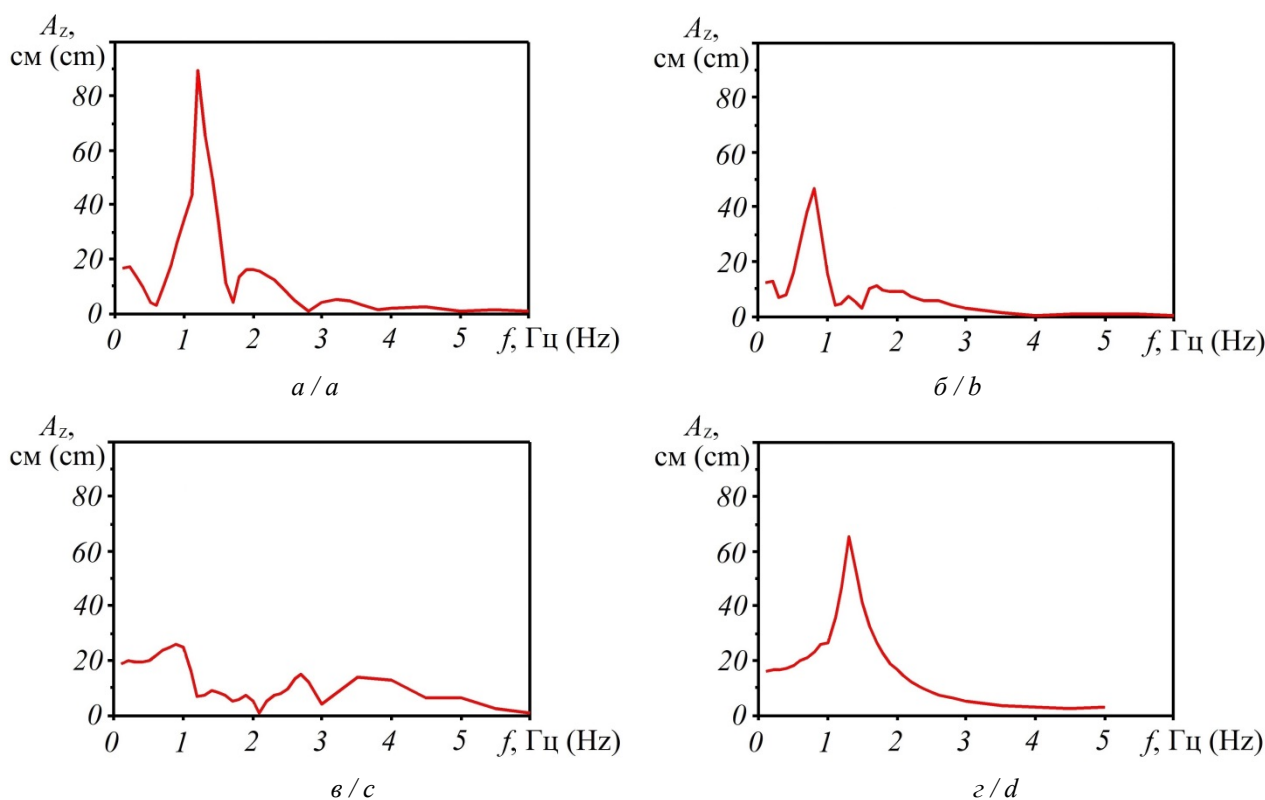


Рисунок 4. Зависимости амплитуды вертикальных колебаний  $A_z$  прицепных звеньев лесовозных автопоездов без рекуперативных амортизаторов от частоты воздействия  $f$  со стороны опорной поверхности лесовозной дороги: *a, г* – лесовозный автомобиль-тягач с прицепом; *б* – лесовозный тягач с полуприцепом; *в* – лесовозный тягач с прицепом-ропуском

Figure 4. Dependences of the amplitude of vertical vibrations  $A_z$  of the trailed links of logging road trains without regenerative shock absorbers on the frequency of impact  $f$  from the supporting surface of the logging road: *a, d* – logging vehicle-tractor with a trailer; *b* – timber tractor with semi-trailer; *c* – timber tractor with trailer

Источник: собственные вычисления авторов  
 Source: authors' own calculations

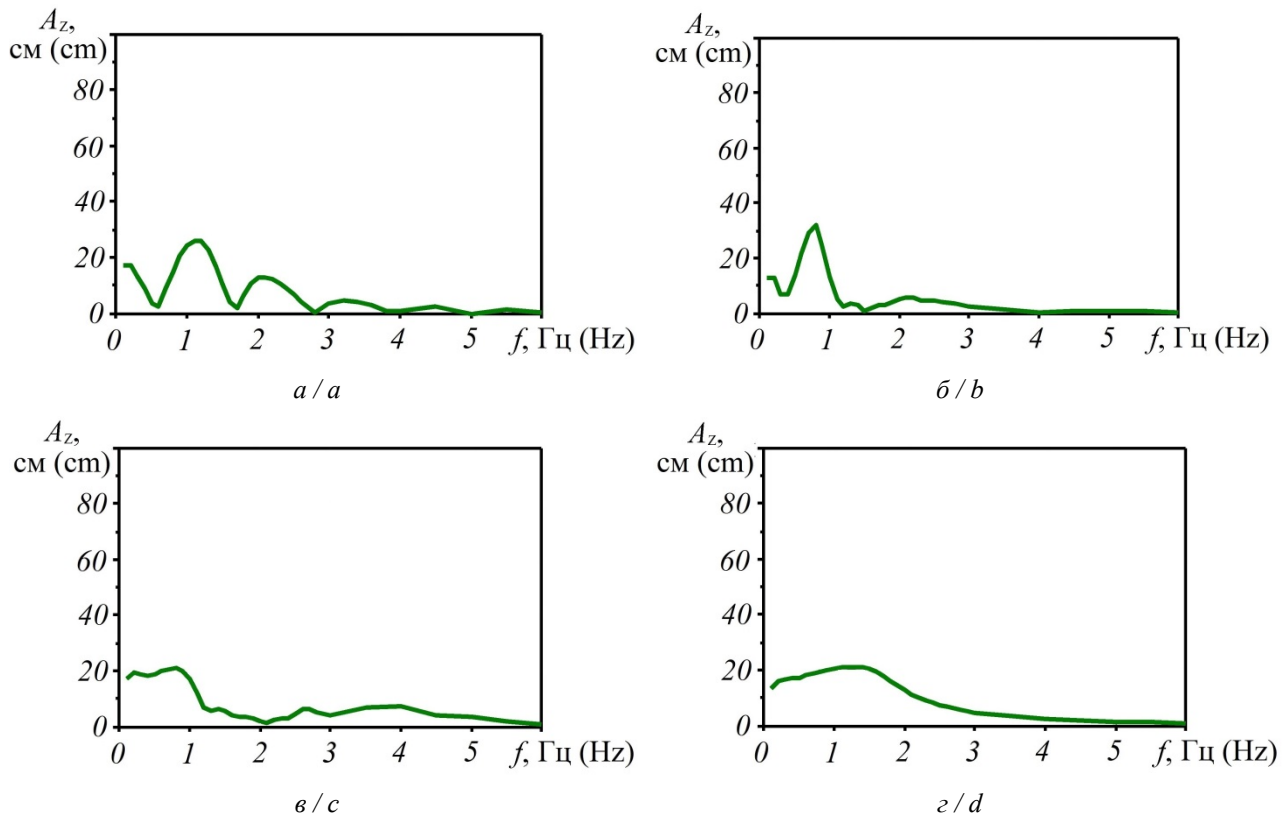


Рисунок 5. Зависимости амплитуды вертикальных колебаний  $A_z$  прицепных звеньев лесовозных автопоездов с рекуперативными амортизаторами от частоты воздействия  $f$  со стороны опорной поверхности лесовозной дороги:  $a, z$  – лесовозный автомобиль-тягач с прицепом;  $b$  – лесовозный тягач с полуприцепом;  $v$  – лесовозный тягач с прицепом-ропуском

Figure 5. Dependences of the amplitude of vertical oscillations  $A_z$  of the trailed links of logging road trains with regenerative shock absorbers on the frequency of impact  $f$  from the supporting surface of the logging road:  $a, d$  – logging vehicle-tractor with a trailer;  $b$  – timber tractor with semi-trailer;  $c$  – timber tractor with trailer

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

наклона без изменения вертикальной координаты центра тяжести. В этой связи на спектре наблюдается четыре явных резонансных пика (рис. 4,  $a$  и рис. 5,  $a$ ), а на зависимости рекуперированной мощности  $N_{recov.}$  от частоты  $f$  наблюдаются высокие пики в диапазоне частот от 2,5 до 6 Гц (рис. 6,  $a$ ). Для лесовозного тягача с полуприцепом и лесовозного тягача с прицепом-ропуском из-за близкого расположения осей происходят практически только вертикальные колебания прицепного звена без существенного изменения его угла наклона. Из-за этого зависимости амплитуды  $A_z$  колебаний и рекуперированной мощности  $N_{recov.}$  от частоты  $f$  вертикальных колебаний имеют более простую форму (рис. 4-6,  $b, v$ ).

Сравнивая амплитудно-частотные характеристики для случаев отсутствия (рис. 4) и наличия (рис. 5) в прицепных звеньях рекуперативных гидравлических амортизаторов, можно сделать вывод, что их установка дает возможность существенно снизить амплитуду резонансных колебаний: для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом с 87 до 26 см, для лесовозного тягача с полуприцепом с 46 до 33 см и для лесовозного тягача с прицепом-ропуском с 27 до 20 см. По зависимостям средней рекуперированной мощности  $N_{recov.}$  от частоты  $f$  (рис. 5,  $a-v$ ) можно сделать вывод, что рекуперативные гидравлические амортизаторы в прицепных звеньях лесовозных автопоездов позволяют при определенных

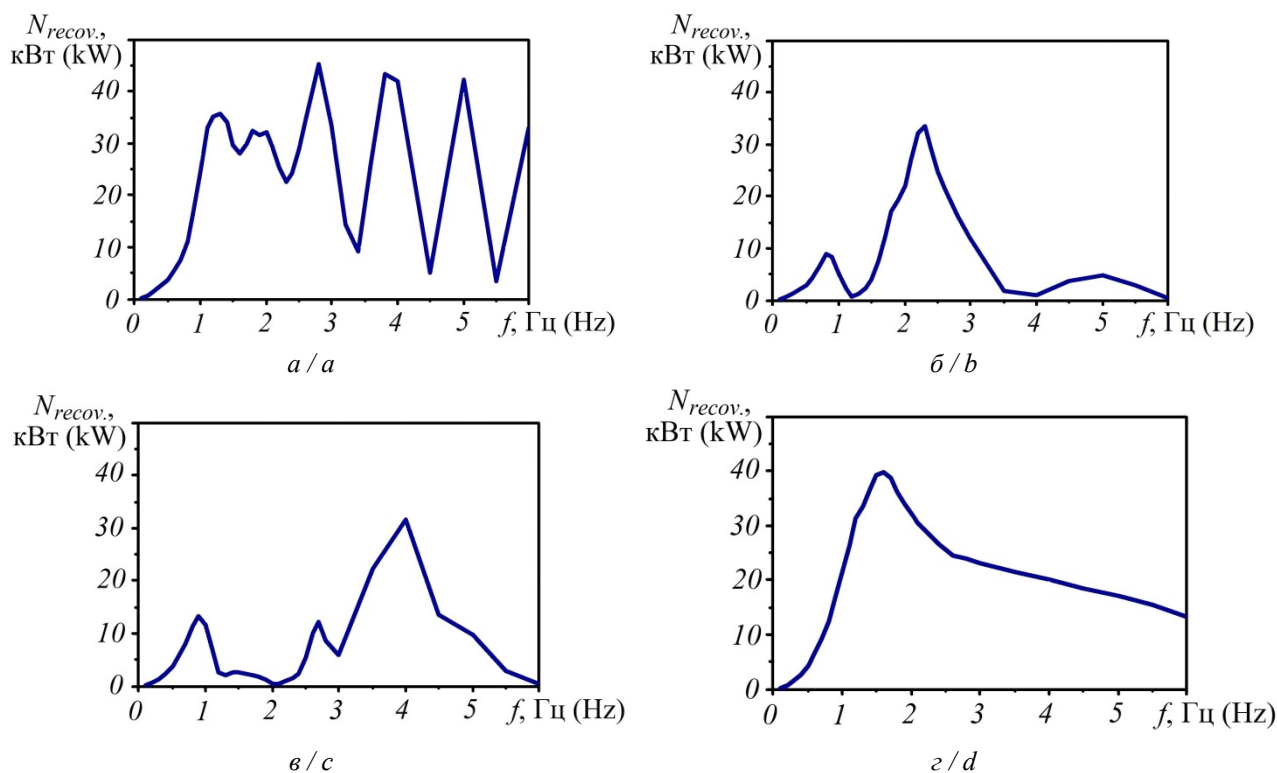


Рисунок 6. Зависимости рекуперированной мощности  $N_{recov.}$  амортизаторами прицепных звеньев лесовозных автопоездов от частоты воздействия  $f$  со стороны опорной поверхности лесовозной дороги:  $a, z$  – лесовозный автомобиль-тягач с прицепом;  $b$  – лесовозный тягач с полуприцепом;  $v$  – лесовозный тягач с прицепом-ропуском

Figure 6. Dependencies of recovered power  $N_{recov.}$  shock absorbers of trailed links of timber road trains depending on the frequency of impact  $f$  from the side of the supporting surface logging road:  $a, d$  – logging vehicle-tractor with a trailer;  $b$  – timber tractor with semi-trailer;  $c$  – timber tractor with trailer

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

частотах колебаний генерировать от 31 до 45 кВт мощности (при постоянной скорости движения лесовозного автопоезда, равной 20 км/ч). Несмотря на то, что в режиме резонанса (при частоте от 0,8 до 1,2 Гц) зависимость рекуперированной мощности  $N_{recov.}$  от частоты  $f$  вертикальных колебаний имеет локальный пик (от 9 до 36 кВт), наибольшая рекуперированная мощность  $N_{recov.}$  наблюдается при более высоких частотах от 2,3 до 4 Гц. Усредненная по исследуемому диапазону частот рекуперированная мощность  $N_{recov.}$  составляет 22,4 кВт для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом, 7,8 кВт для лесовозного тягача с полуприцепом и 9,1 кВт для тягача с прицепом-ропуском.

### Обсуждение

Для построения амплитудно-частотной характеристики необходимо варьировать частоту вынуждающей силы и измерять амплитуду колебаний. Выше варьирование частоты производилось путем изменения периода синусоидального профиля поверхности дороги при постоянной скорости движения автопоезда 20 км/ч. Возможен другой способ варьирования частоты вынуждающей силы: изменение скорости движения лесовозного автопоезда при фиксированных параметрах синусоидальной опорной поверхности. Проведена серия компьютерных экспериментов только для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом, в которой варьировали скорость на 34 уровнях при постоянном периоде синусоиды опорной поверхности  $L = 2,778$  м так, чтобы частота

вынуждающей силы попадала в тот же диапазон от 0,1 до 6 Гц (рис. 4-6, *з*). Как можно было ожидать, полученные принципиально различными способами амплитудно-частотные характеристики в целом различаются. В то же время можно выделить общие особенности, которые, по всей вероятности, являются фундаментальными для резонанса лесовозного автопоезда. Основной резонансный пик проявляется практически при той же частоте 1,3 Гц (для первого способа построения амплитудно-частотной характеристики – 1,2 Гц). Использование рекуперативных гидравлических амортизаторов позволяет снизить резонансную амплитуду колебаний на 68 % с 65 до 21 см (для первого способа построения амплитудно-частотной характеристики на 70 % с 87 до 26 см). Рекуперлируемая мощность в резонансном режиме составляет 40 кВт (ранее 36 кВт). Усредненная по частотам рекуперлируемая мощность составляет 16,5 кВт (ранее 22,4 кВт).

В зависимости от конструкции и параметров рекуперативных амортизаторов они могут обеспечивать различные значения дополнительного коэффициента демпфирования  $d_p$  (рис. 7).

Для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом проведена серия компьютерных экспериментов, в которой варьировали коэффициент демпфирования  $d_p$  от 0 до 70 кН·с/м на 14 различных уровнях. При этом частота вынуждающей силы 1,2 Гц соответствовала основному резонансному пику амплитудно-частотной характеристики. Обнаружено, что с увеличением коэффициента демпфирования  $d_p$  от

0 до 30 кН·с/м амплитуда  $A_z$  вертикальных колебаний прицепа резко уменьшается с 87 до 20 см (рис. 7, *а*). При дальнейшем увеличении коэффициента демпфирования  $d_p$  от 30 до 70 кН·с/м амплитуда  $A_z$  уменьшается слабее – от 20 до 11 см. Рекуперлируемая мощность  $N_{recov.}$  имеет максимальное значение около 35 кВт в диапазоне коэффициентов демпфирования от 10 до 30 кН·с/м (рис. 7, *б*). При этом статистическая достоверность границ доверительного интервала составила 0,95, а статистическая надежность границ интервала прогнозирования – 0,95. Оптимальный коэффициент демпфирования отдельного рекуперативного гидравлического амортизатора составляет 30 кН·с/м. При этом амплитуда резонансных вертикальных колебаний снижается с 87 до 20 см, а рекуперлируемая мощность имеет практически максимальное значение 34 кВт.

Результаты, приведенные в данной статье, могут быть использованы в процессе проектирования аналогичных рекуперативных гидравлических амортизаторов, устанавливаемых в прицепных звеньях лесовозных автопоездов. Последующее исследование будет связано с экспериментальной проверкой математической модели, представленной в статье, для более детального изучения влияния возможных неустановившихся режимов движения лесовозных автопоездов в изменяющихся сложных дорожных условиях на процесс генерирования энергии рабочей жидкости, а также изменение динамических характеристик автопоездов.

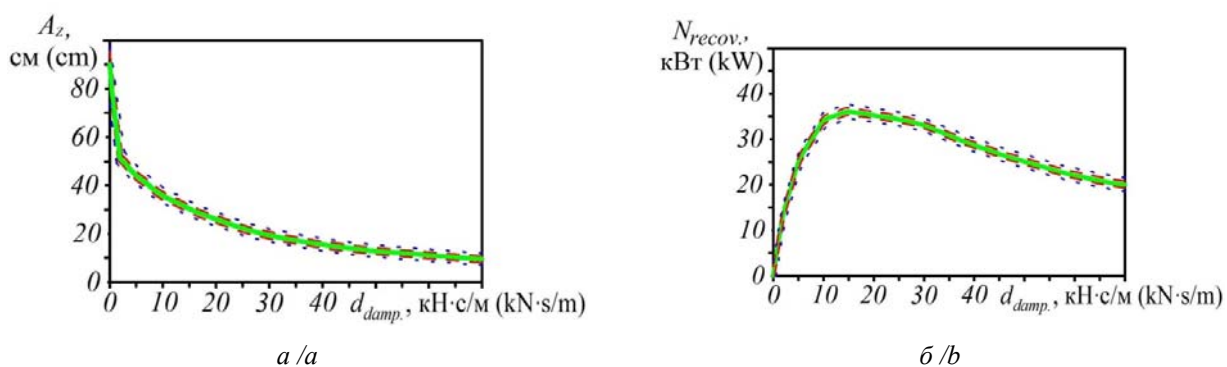


Рисунок 7. Зависимости амплитуды вертикальных колебаний  $A_z$  лесовозного автопоезда – *a* и рекуперлируемой мощности  $N_{recov.}$  амортизаторами прицепа – *б* от коэффициента демпфирования  $d_{damp}$ .

Figure 7. Dependences of the amplitude of vertical oscillations  $A_z$  of a timber road train – *a* and the recovered power  $N_{recov.}$  trailer shock absorbers – *b* from the damping coefficient  $d_{damp}$ .

Источник: собственная схема авторов / Source: authors' own scheme

### Заключение

Анализ приведенных научных работ позволил установить, что все они направлены на: повышение безопасности движения транспортного средства; улучшение комфортности и устойчивости при движении автомобиля; увеличение мощности генерируемой энергии подвеской; уменьшение вибраций и колебаний; упрощение конструкции подвески; повышение демпфирующей силы подвески; снижение транспортных расходов; сведение к минимуму динамических нагрузок и резонансных явлений; сокращение расхода топлива; оптимизацию рабочих и конструктивных параметров подвески; уменьшение массы и габаритных размеров подвески; обеспечение удобства в техническом обслуживании и ремонте. Проведенный анализ статей позволил установить, что реализация перечисленных показателей может достигаться за счет разработки и исследования: рекуперативных гидравлической и электрогидравлической интегрированных взаимосвязанных подвесок; активных подвесок транспортных средств; магнитных демпферов с энергосберегающим эффектом; контроллеров ориентации за движением кузова автомобиля; регуляторов переключения для полуактивных магнитореологических амортизаторов; управляемых систем подвески транспортных средств, позволяющих в реальном режиме времени адаптироваться к изменяющимся дорожным условиям.

Разработана математическая модель, позволяющая исследовать резонансные режимы вертикальных колебаний и влияния на них параметров системы рекуперации при движении лесовозных автопоездов в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог. Разработаны три компьютерные программы для исследования эффективности рекуперативных гидравлических амортизаторов, установленных в подвесках прицепных звеньев лесовозных автопоездов, а также влияние этих амортизаторов на снижение резонансных явлений.

Установлено, что при движении лесовозного автопоезда со скоростью 20 км/ч по опорной поверхности модельной лесовозной дороги с синусоидальным профилем и амплитудой синусоиды 0,1 м наблюдается резонансное увеличение амплитуды

колебаний центра тяжести прицепа лесовозного автопоезда до 87 см при частоте вынуждающей силы 1,2 Гц, до 46 см для полуприцепа лесовозного автопоезда при частоте 0,8 Гц и до 27 см для прицепа-ропуски лесовозного автопоезда при частоте 0,9 Гц. Оснащение подвесок прицепных звеньев рекуперативными гидравлическими амортизаторами позволяет снизить амплитуду резонансных колебаний для тягача с прицепом-ропуском с 27 до 20 см, для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом с 87 до 26 см и для седельного автопоезда с 46 до 33 см.

Рекуперативные амортизаторы, установленные в подвесках прицепных звеньев лесовозных автопоездов, позволяют при определенных частотах колебаний при движении автопоезда с постоянной скоростью 20 км/ч генерировать от 31 до 45 кВт мощности. Несмотря на то, что в режиме резонанса (при частоте от 0,8 до 1,2 Гц) зависимость генерируемой рекуперированной мощности от частоты имеет локальный пик в диапазоне от 9 до 36 кВт, наибольшее значение рекуперированной мощности наблюдается при частотах в диапазоне от 2,3 до 4 Гц. Установлено, что среднее значение рекуперированной мощности составляет 22,4 кВт для лесовозного тягача с прицепом, 7,8 кВт для седельного автопоезда и 9,1 кВт для тягача с прицепом-ропуском. Для контроля амплитудно-частотных характеристик построены другим способом варьирования частоты вынуждающей силы, путем изменения скорости движения лесовозного автопоезда при фиксированных параметрах синусоидальной опорной поверхности модельной лесовозной дороги. При этом основные характеристики резонанса и показатели эффективности рекуперативных гидравлических амортизаторов изменились не более чем на 10 %. Оптимальный коэффициент демпфирования отдельного рекуперативного гидравлического амортизатора составляет 30 кН·с/м. При этом амплитуда резонансных вертикальных колебаний снижается с 87 до 20 см, а рекуперированная мощность имеет практически максимальное значение 34 кВт.

## Список литературы

1. Мохирев, А. П. Закономерности ранговых распределений факторов вывозки древесины с лесных участков / А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников, П. М. Мазуркин // Лесной вестник / Forestry Bulletin, – 2021. – Т. 25. № 4. С. 112-120. – *Библиогр. : с. 117-118 (20 назв.)*. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-4-112-120>
2. Верификация экспериментами моделей скорости движения лесовозов в зависимости от природно-производственных факторов / А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников, П. М. Мазуркин, Н. А. Брагина // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 108-115. – *Библиогр. : с. 113 (21 назв.)*. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-108-115>
3. Мазуркин, П. М. Рейтинги групп факторов вывозки сортиментов / П. М. Мазуркин, А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников // Resources and Technology. – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 37-52. – *Библиогр. : с. 50-51 (12 назв.)*. – DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5803>
4. Посметьев, В. И. Обоснование целесообразности оснащения лесовозных автопоездов рекуперативными тягово-сцепными устройствами по результатам имитационного моделирования : монография / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев. – Воронеж, 2023. – 204 с. – *Библиогр. : с. 185-203 (141 назв.)*. Режим доступа : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61082376>
5. Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного сцепного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. В. Посметьев, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1(49). – С. 162-179. – *Библиогр. : с. 176-177 (20 назв.)*. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>
6. Имитационное моделирование работы рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, И. В. Сизьмин, В. В. Посметьев, Н. В. Мозговой, П. В. Колодий // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 4.1(52). – С. 92-113. – *Библиогр. : с. 110-112 (20 назв.)*. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/6>
7. 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 высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 5(389). – С. 85-99. – *Библиогр. : с. 98-99 (20 назв.)*. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>
8. Имитационное моделирование рекуперативного пружинно-гидравлического седельно-сцепного устройства лесовозного тягача с полуприцепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, А. В. Авдюхин // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10, № 4(40). – С. 227-242. – *Библиогр. : с. 239-241 (20 назв.)*. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/19>
9. Attitude Control of Vehicle Based on Series Active Suspensions / Jia W., Zhang W., Ma F., Wu L. // Actuators 2023, 12, 67. – *Bibliogr. : pp. 19-20 (36 titles)*. – DOI: <https://doi.org/10.3390/act12020067> (SNIP 0,975)
10. Dynamic Performance of a Magnetic Energy-Harvesting Suspension: Analysis and Experimental Verification / Zhou R., Song Y., Jin J., Xu F., Sun F., Yang L., Yan M. // Actuators 2023, 12, 308. – *Bibliogr. : pp. 13-14 (41 titles)*. – DOI: <https://doi.org/10.3390/act12080308> (SNIP 0,975)
11. Vibration Control of Car Body and Wheel Motions for In-Wheel Motor Vehicles Using Road Type Classification / Kim Y.-J., Sohn Y., Chang S., Choi S.-B., Oh J.-S. // Actuators 2024, 13, 80. – *Bibliogr. : pp. 15-16 (39 titles)*. – DOI: <https://doi.org/10.3390/act13020080> (SNIP 0,975)
12. Nonlinear Modeling and Coordinate Optimization of a Semi-Active Energy Regenerative Suspension with an Electro-Hydraulic Actuator / Kou F., Du J., Wang Z., Li D., Xu J. // Algorithms 2018, 11, 12. – *Bibliogr. : pp. 16-17 (24 titles)*. – DOI: <https://doi.org/10.3390/a11020012> (SNIP 0,975)
13. Krauze P. Driving Safety Improved with Control of Magnetorheological Dampers in Vehicle Suspension / P. Krauze, J. Kasprzyk // Appl. Sci. 2020, 10, 8892. – *Bibliogr. : pp. 27-29 (52 titles)*. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app10248892> (SNIP 0,573)



14. Investigation of Vehicle Stability with Consideration of Suspension Performance / Lukosevicius V., Makaras R., Rutka A., Kersys R., Darguzis A., Skvireckas R. // *Appl. Sci.* 2021, 11, 9778. – *Bibliogr.* : pp. 29-31 (50 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app11209778> (SNIP 0,573)
15. Han S.-Y. Vibration Control for a Vehicle Semi-Active Suspension System via the PPO Approach / Han S.-Y., Liang T. // *Appl. Sci.* 2022, 12, 3078. – *Bibliogr.* : pp. 16-17 (32 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app12063078> (SNIP 0,573)
16. Hydraulic Integrated Interconnected Regenerative Suspension: Sensitivity Analysis and Parameter Optimization / Guo S., Chen L., Pan Y., Wang X., Tan G. // *Electronics* 2023, 12, 891. – *Bibliogr.* : pp. 21-22 (34 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12040891> (SNIP 1,045)
17. Research Review of a Vehicle Energy-Regenerative Suspension System / Lv X., Ji Y., Zhao H., Zhang J., Zhang G., Zhang L. // *Energies* 2020, 13, 441. – *Bibliogr.* : pp. 11-14 (68 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en13020441> (SNIP 1,025)
18. Gijón-Rivera C. Methodology for Comprehensive Comparison of Energy Harvesting Shock Absorber Systems / Gijon-Rivera C., Olazagoitia J. L. // *Energies* 2020, 13, 6110. – *Bibliogr.* : pp. 23-25 (29 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en13226110> (SNIP 1,025)
19. Hydraulic Integrated Interconnected Regenerative Suspension: Modeling and Characteristics Analysis / Guo S., Chen L., Wan X., Zou J., Hu S. // *Micromachines* 2021, 12, 733. – *Bibliogr.* : pp. 20-22 (44 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12070733> (SNIP 0,95)
20. Guntur H. L. Designing hydro-magnetolectric regenerative shock absorber for vehicle suspension considering conventional-viscous shock absorber performance / Guntur H. L., Hendrowati W., Syuhri S. N. H. // *Journal of Mechanical Science and Technology* 34 (1) (2020) 55-67. – *Bibliogr.* : pp. 66-67 (30 titles). – DOI: <http://doi.org/10.1007/s12206-019-1205-1> (SNIP 0,843)
21. Krauze P. Identification of Control-Related Signal Path for Semi-Active Vehicle Suspension with Magnetorheological Dampers / P. Krauze // *Sensors* 2023, 23, 5770. – *Bibliogr.* : pp. 26-27 (50 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/s23125770> (SNIP 1,317)
22. Huang J. Analysis and Research on the Comprehensive Performance of Vehicle Magnetorheological Regenerative Suspension / Huang J., Wang E., Zhang H. // *Vehicles* 2020, 2, 576-588. – *Bibliogr.* : pp. 587-588 (14 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles2040033> (SNIP 0,955)
23. Yaghoubi S. Modeling and optimization of car suspension system in the presence of magnetorheological damper using Simulink-PSO hybrid technique / Yaghoubi S., Ghanbarzadeh A. // *Results in Engineering* 22 (2024) 102065. – *Bibliogr.* : pp. 6-7 (34 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102065> (SNIP 1,613)

### References

1. Mohirev A. P., Rukomoinikov K. P., Mazurkin P. M. *Zakonomernosti rangovyh raspredelenij faktorov vyvozki drevesiny s lesnyh uchastkov* [Patterns of rank distributions of wood removal factors from forest areas]. *Forestry Bulletin.* – 2021. Vol. 25. № 4. P. 112-120. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-4-112-120> (In Russ.).
2. Mokhiev A. P., Rukomoinikov K. P., Mazurkin P. M., Bragina N. A. *Verifikaciya eksperimentami modelej skorosti dvizheniya lesovozov v zavisimosti ot prirodno-proizvodstvennyh faktorov* [Verification by experiments of models of the speed of movement of timber trucks depending on natural and production factors]. *Forestry Bulletin.* – 2021. – Vol. 25, №. 2. – P. 108-115. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-108-115> (In Russ.).
3. Mazurkin P. M., Mohirev A. P., Rukomoinikov K. P. *Rejtingi grupp faktorov vyvozki sortimentov* [Ratings of groups of factors for the removal of logs]. *Resources and Technology.* – 2021. – Vol. 18, №. 3. – P. 37-52. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5803> (In Russ.).
4. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. *Obosnovanie celesoobraznosti osnascheniya lesovoznih avtopoezdov rekuperativnimi tyagovo-scepnimi ustroystvami po rezultatam imitacionnogo modelirovaniya* [Justification of the feasibility of equipping timber hauling road trains with regenerative towing devices based on the results of

simulation modeling]. Monograph. Voronezh, 2023. 204 p. (In Russ.). URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61082376>

5. Nikonov V. O., Posmetev V. I., Zelikov V. A., Posmetev V. V., Chujkov A. S. *Optimizaciya konstruktivnyh parametrov regenerativnogo scepного устройства, ustanovlennogo v lesovoznom avtomobile s pricepom* [Optimization of design parameters of a regenerative coupling device installed in a timber truck with a trailer]. Forestry Engineering journal. – 2023. – Vol. 13. – № 1 (49). – S. 162-179. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11> (In Russ.).

6. Nikonov V. O., Posmetev V. I., Sizmin I. V., Posmetev V. V., Mozgovoi N. V., Kolodii P. V. *Imitacionnoe modelirovanie raboti regenerativnogo pnevmogidravlichesкого dishla scepного устройства avtopoezda s funkciei samovitaskivaniya* [Simulation modeling of the operation of a regenerative pneumohydraulic drawbar of a road train coupling device with a self-pulling function]. Forestry Engineering journal. – 2023. – Vol. 13. – № 4.1 (52). – S. 92-113. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/6> (In Russ.).

7. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Manukovskii A. Yu., Posmetev V. V. *Kompyuternoe modelirovanie raboti regenerativnogo povorotного konikovого устройства lesovozного tyagacha s pricepom-rospuskom* [Computer modeling of the operation of a regenerative rotary cone device of a timber tractor with a spreader trailer]. Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). – 2022. – № 5(389). – pp. 85-99. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99> (In Russ.).

8. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Avdyuhin A. V. *Imitacionnoe modelirovanie regenerativного пружинно-гидравлического седельно-сцепного устройства lesovozного tyagacha s polupricepom* [Simulation modeling of a regenerative spring-hydraulic fifth wheel coupling device for a timber tractor with a semi-trailer]. Forestry Engineering journal. – 2020. – Vol. 10. – № 4 (40). – S. 227-242. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/19> (In Russ.).

9. Jia W., Zhang W., Ma F., Wu L. Attitude Control of Vehicle Based on Series Active Suspensions. *Actuators* 2023, 12, 67. DOI: <https://doi.org/10.3390/act12020067>

10. Zhou R., Song Y., Jin J., Xu F., Sun F., Yang L., Yan M. Dynamic Performance of a Magnetic Energy-Harvesting Suspension: Analysis and Experimental Verification. *Actuators* 2023, 12, 308. DOI: <https://doi.org/10.3390/act12080308>

11. Kim Y.-J., Sohn Y., Chang S., Choi S.-B., Oh J.-S. Vibration Control of Car Body and Wheel Motions for In-Wheel Motor Vehicles Using Road Type Classification. *Actuators* 2024, 13, 80. DOI: <https://doi.org/10.3390/act13020080>

12. Kou F., Du J., Wang Z., Li D., Xu J. Nonlinear Modeling and Coordinate Optimization of a Semi-Active Energy Regenerative Suspension with an Electro-Hydraulic Actuator. *Algorithms* 2018, 11, 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/a11020012>

13. Krauze P., Kasprzyk J. Driving Safety Improved with Control of Magnetorheological Dampers in Vehicle Suspension. *Appl. Sci.* 2020, 10, 8892. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10248892>

14. Lukosevicius V., Makaras R., Rutka A., Kersys R., Darguzis A., Skvireckas R. Investigation of Vehicle Stability with Consideration of Suspension Performance. *Appl. Sci.* 2021, 11, 9778. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11209778>

15. Han S.-Y., Liang, T. Vibration Control for a Vehicle Semi-Active Suspension System via the PPO Approach. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3078. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12063078>

16. Guo S., Chen L., Pan Y., Wang X., Tan, G. Hydraulic Integrated Interconnected Regenerative Suspension: Sensitivity Analysis and Parameter Optimization. *Electronics* 2023, 12, 891. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12040891>

17. Lv X., Ji Y., Zhao H., Zhang J., Zhang G., Zhang L. Research Review of a Vehicle Energy-Regenerative Suspension System. *Energies* 2020, 13, 441. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13020441>

18. Gijon-Rivera C., Olazagoitia J. L. Methodology for Comprehensive Comparison of Energy Harvesting Shock Absorber Systems. *Energies* 2020, 13, 6110. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13226110>

19. Guo S., Chen L., Wan X., Zou J., Hu S. Hydraulic Integrated Interconnected Regenerative Suspension: Modeling and Characteristics Analysis. *Micromachines* 2021, 12, 733. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi12070733>

20. Guntur H. L., Hendrowati W., Syuhri S. N. H. Designing hydro-magnetolectric regenerative shock absorber for vehicle suspension considering conventional-viscous shock absorber performance. *Journal of Mechanical Science and Technology* 34 (1) (2020) 55-67. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12206-019-1205-1>

21. Krauze P. Identification of Control-Related Signal Path for Semi-Active Vehicle Suspension with Magnetorheological Dampers. *Sensors* 2023, 23, 5770. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23125770>

22. Huang J., Wang E., Zhang H. Analysis and Research on the Comprehensive Performance of Vehicle Magnetorheological Regenerative Suspension. *Vehicles* 2020, 2, 576-588. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles2040033>

23. Yaghoubi S., Ghanbarzadeh A. Modeling and optimization of car suspension system in the presence of magnetorheological damper using Simulink-PSO hybrid technique. *Results in Engineering* 22 (2024) 102065. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102065>

### Сведения об авторах

✉ *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, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: [8888nike8888@mail.ru](mailto:8888nike8888@mail.ru).

*Посметьев Валерий Иванович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru).

*Посметьев Виктор Валерьевич* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: [victorvpo@mail.ru](mailto:victorvpo@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, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

### Information about the authors

✉ *Vadim O. Nikonov* – Cand. Sci. (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, Timiryazev st., 8, 394087, Voronezh, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: [8888nike8888@mail.ru](mailto:8888nike8888@mail.ru).

*Valerii I. Posmetev* – Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, 394087, Voronezh, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru).

*Viktor V. Posmetev* – Cand. Sci. (Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, 394087, Voronezh, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: [victorvpo@mail.ru](mailto:victorvpo@mail.ru).

*Vladimir A. Zelikov* – Dr. Sci. (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 st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/15>

УДК 630 : 629.11.02/098



## Имитационное моделирование работы рекуперативных электромагнитных амортизаторов, установленных в подвеске лесовозного автопоезда

**Валерий И. Посметьев**, posmetyev@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

**Вадим О. Никонов** , 8888nike8888@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

**Виктор В. Посметьев**, victorvpo@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

**Владимир А. Зеликов**, zelikov-vrn@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

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

В данной статье решается проблема повышения энергоэффективности процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. Опыт эксплуатации показывает, что более 10 % энергии топлива расходуется лесовозным автопоездом на процессы трения в подвесках его звеньев. Обоснована актуальность целесообразности преобразования, накопления и полезного использования рассеиваемой в подвеске автопоезда энергии. Потенциал современных разработок российских и зарубежных ученых в области преобразования энергии колебаний в электрическую энергию различными по конструкции амортизаторами подвесок является достаточно значительным. При проектировании рекуперативных электромагнитных амортизаторов, все еще возникают проблемные вопросы, связанные с их ограниченной генерируемой мощностью. С целью повышения производительности генерирования электрической энергии, предложена перспективная конструкция рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах. Исследование выполнялось на основе методов математического и имитационного моделирования. При изменении высоты неровностей от 0,1 до 0,9 м рекуперированная электрическая мощность увеличивается с 0,34 до 10,5 кВт. При движении лесовозного автопоезда со скоростью 20 км/ч по неровностям опорной поверхности малой высоты – 0 ... 0,2 м, рекуперативные амортизаторы генерируют ограниченную мощность, не превышающую 1,35 кВт. При высоте неровностей опорной поверхности – 0,4 ... 0,6 м рекуперативные амортизаторы генерируют мощность в диапазоне от 4,2 до 6,8 кВт. При увеличении скорости движения автопоезда от 10 до 30 км/ч рекуперированная электрическая мощность увеличивается с 1,17 до 7,94 кВт. Использование полученных результатов позволит конструкторам на стадии проектирования осуществлять доработку аналогичных конструкций рекуперативных электромагнитных амортизаторов.

**Ключевые слова:** лесовозный автомобиль-тягач, рекуперативный электромагнитный амортизатор, поверхность лесовозной дороги, численное интегрирование, магнитная индукция, рекуперированная электрическая мощность, компьютерная программа, кольцевые магниты, производительность

**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:** Имитационное моделирование работы рекуперативных электромагнитных амортизаторов, установленных в подвеске лесовозного автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, В. А. Зеликов // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 260–279. – Библиогр.: с. 275–278 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/15>.

*Поступила* 11.04.2024. *Пересмотрена* 25.04.2024. *Принята* 25.04.2024 *Опубликована онлайн* 17.06.2024

*Article*

## Simulation modeling of the operation of regenerative electromagnetic shock absorbers installed in the suspension of a timber road train

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>

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

### Abstract

This article solves the problem of increasing the energy efficiency of the process of removing timber by logging road trains. Operating experience shows that more than 10 % of the fuel energy is consumed by a timber road train on friction processes in the suspensions of its links. The relevance of the feasibility of transformation, accumulation and beneficial use of energy dissipated in the suspension of a road train is substantiated. The potential of modern developments by Russian and foreign scientists in the field of converting vibration energy into electrical energy using suspension shock absorbers of various designs is quite significant. When designing regenerative electromagnetic shock absorbers, problematic issues still arise related to their limited generated power. In order to increase the productivity of electrical energy generation, a promising design of a regenerative electromagnetic shock absorber based on permanent magnets has been proposed. The study was carried out based on mathematical and simulation modeling methods. When the height of unevenness changes from 0.1 to 0.9 m, the recovered electrical power increases from 0.34 to 10.5 kW. When a logging road train moves at a speed of 20 km/h over uneven supporting surfaces of low height – 0 ... 0.2 m, regenerative shock absorbers generate limited power not exceeding 1.35 kW. With a height of unevenness of the supporting surface of 0.4 ... 0.6 m, regenerative shock absorbers generate power in the range from 4.2 to 6.8 kW. When the speed of the road train increases from 10 to 30 km/h, the recovered electrical power increases from 1.17 to 7.94 kW. The use of the results obtained will allow designers to refine similar designs of regenerative electromagnetic shock absorbers at the design stage.

**Keywords:** *logging truck, regenerative electromagnetic shock absorber, logging road surface, numerical integration, magnetic induction, recovered electrical power, computer program, ring magnets, productivity*

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

**Acknowledgments:** author(s) thank(s) the reviewers for their contribution to the peer review.

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

**For citation:** Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Zelikov V. A. (2024). Simulation modeling of the operation of regenerative electromagnetic shock absorbers installed in the suspension of a timber road train. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, №. 2 (54), pp. 260-279 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/15>.

*Received* 11.04.2024. *Revised* 25.04.2024. *Accepted* 25.04.2024. *Published online* 17.06.2024.

### Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем лесозаготовительной промышленности, является повышение энергоэффективности процесса вывозки лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом. Известно, что автомобильный транспорт потребляет более 50 % всех производимых нефтепродуктов. Несмотря на это, только 10-16 % энергии топлива расходуется лесовозным автопоездом с двигателем внутреннего сгорания на полезную работу при движении в процессе транспортирования лесоматериалов. Остальная часть энергии – 84-90 %, расходуется на трение и рассеивается в виде тепла в окружающее пространство. При этом около 10 % от этой рассеиваемой энергии расходуется на тепловые потери в подвеске лесовозного автопоезда. Более высокая скорость движения автопоезда, более низкий уровень обустроенности лесовозных дорог сопровождаются возрастанием рассеивания энергии [1].

Подвеска современного лесовозного автопоезда является одним из важнейших узлов ходовой части, от которого зависит управляемость, комфортность, маневренность, а также безопасность движения при вывозке древесины в существующих дорожных условиях. Неустановившиеся режимы движения лесовозного автопоезда сопровождаются возникновением между его поддресоренными и неподдресоренными массами значительных динамических нагрузок, которые за счет демпфирующих свойств и жесткости подвески преобразуются из кинетической энергии колебаний массы в энергию тепла, которая через детали подвески непроизводительно рассеивается в окружающую среду. Такую рассеиваемую энергию целесообразно преобразовывать, накапливать и полезно использовать в технологическом оборудовании автопоезда, а также для питания приборов и систем лесовозного автомобиля-тягача. Это позволит сократить расход топлива автопоездом на 5-6 % при вывозке лесоматериалов, и, как следствие снизить транспортные расходы, от которых зависит конечная стоимость вывозимых лесоматериалов [2-8].

Исследованием вопросов рекуперации энергии в подвесках автомобильных транспортных средств в настоящее время занято большое количество, как российских, так и зарубежных ученых.

Внимание многих этих ученых направлено на разработку перспективных рекуперативных электромагнитных амортизаторов, которые не только обладают демпфирующими свойствами для гашения колебаний возникающих при движении автомобильных транспортных средств в условиях недостаточно обустроенных дорог, но и возможностью генерирования электрической энергии [9-23].

В статье J. Zhang и др. (2022) [9] предложена, а также исследована на основе математического моделирования устанавливаемая на автомобиле рекуперативная подвеска шарико-винтового типа, использующая в качестве алгоритма активного управления пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор, обладающий высокой надежностью, простотой и стабильным управлением. Подвеска рассматриваемого типа состоит из пружины, демпфера, рекуперативного привода, контроллера, аккумулятора, датчика ускорения кузова, энергерегенеративного двигателя и шарико-винтового механизма. В режиме рекуперации энергии вертикальная вибрация подвески преобразуется во вращательное движение ротора двигателя, генерирующего электроэнергию, накапливаемую в аккумуляторе для дальнейшего полезного использования. Установлено, что с увеличением частоты вибрации подвески происходит возрастание мощности рекуперации электрической энергии. Применение пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора позволяет оптимизировать плавность движения транспортного средства.

G. Ну и др. (2021) [10] в своей работе рассмотрели особенности проектирования магнитоэологических амортизаторов для автомобильных транспортных средств, обладающих в сравнении с обычными гидравлическими амортизаторами лучшими управляемостью и демпфированием, а также обеспечивающих повышение комфорта и ходовых качеств автомобилей. Создаваемая демпфирующая сила исследуемого амортизатора контролируется током возбуждения. Когда амортизатор подвергается воздействию вибрации, возвратно-поступательное движение поршня вызывает изменение объемов в полостях амортизатора и рабочая жидкость перетекает через демпфирующий канал. Катушка возбуждения

равномерно намотана на поршне. При подаче на катушку напряжения, вокруг нее создается магнитное поле, способствующее возникновению реологического эффекта, изменяющего вязкость и предел текучести рабочей жидкости, и, следовательно, давление в полостях амортизатора, тем самым достигая эффекта управления создаваемой демпфирующей силой. Для более точного исследования характеристик демпфирования магнитореологических амортизаторов была разработана имитационная модель мультифизической связи, позволившая выполнить анализ взаимодействия электромагнитного поля, полей потока и структурных напряжений. Результаты моделирования позволили установить, что сила демпфирования составляет 1134,6 Н, регулируемый коэффициент демпфирования – 9,1 при приложенном токе 1,4 А. Кроме этого, выявлено, что сила демпфирования увеличивается с повышением приложенного тока.

Н. Song и др. (2024) [11] в своем исследовании рассмотрели проблему снижения производительности, надежности, а также ухудшения характеристик подвески транспортного средства при использовании в его конструкции рекуперативных амортизаторов с шарико-винтовой передачей. Разработана динамическая модель рекуперативной подвески, позволившая исследовать негативное влияние инерционной массы на изменение характеристик подвески. Установлено, что при вертикальном возвратно-поступательном перемещении подвески вращающиеся детали создают чрезмерный ударный момент, ускоряющий их повреждение и оказывающий негативное воздействие на работу подвески. Предложена усовершенствованная конструкция рекуперативной подвески, позволяющая за счет снижения ускорения подрессоренной массы и более эффективного демпфирования динамических нагрузок улучшить комфорт при вождении и управляемость транспортного средства. Усовершенствование заключается в установке между рекуперативным амортизатором и колесом подавителя высокочастотной вибрации. При движении автомобиля по неровностям дороги, вертикальные колебания подвески при помощи реечной и планетарной передачи преобразуются из механической энергии вибрации в электрическую энергию. Наличие контроллера в

подвеске обеспечивает два режима управления подвеской – режим энергопотребления и режим поглощения энергии.

Y. Jia и др. (2018) [12] в своей статье акцентировали внимание на фундаментальной проблеме всех существующих подходов к рекуперации энергии в подвесках автомобилей, заключающейся в том, что большая часть энергии вибрации по-прежнему рассеивается в окружающее пространство через детали амортизатора. Накопление энергии происходит в основном за счет паразитного демпфирования, составляющего лишь небольшую долю от общего демпфирования пружинного амортизатора. Рассмотрена перспективная рекуперативная подвеска, в конструкции которой используются амортизаторы с постоянными магнитами, обеспечивающие значительное увеличение генерируемой энергии за счет прямого подключения электромагнитного преобразователя в качестве основного демпфера. Установлено, что предлагаемая подвеска может генерировать до 100 кВт энергии при движении автомобиля со скоростью более 105 км/ч по ровной дороге с твердым покрытием, при этом обеспечивая среднее ускорение реакции –  $0,315 \text{ м/с}^2$ . Нелинейная восстанавливающая сила магнитного амортизатора обеспечивает лучший комфорт и управляемость автомобиля в сравнении с механическими, пневматическими и гидравлическими амортизаторами.

В работе М.-Т. Duong и др. (2018) [13] была рассмотрена проблема недостаточной мощности, генерируемой при движении автомобиля рекуперативной подвеской. На этой основе была предложена и исследована усовершенствованная конструкция рекуперативной подвески, сочетающая в себе механический амортизатор с электрическим генератором. Внешний диаметр амортизатора составлял 110 мм, внутренний – 40 мм, а его длина – 243 мм. Основными недостатками предлагаемого амортизатора являются его высокие сила сцепления и магнитная сила, отрицательно влияющие на безопасность и комфорт движения. Использование такой конструкции позволяет повысить рекуперированную мощность на 59,7 % без изменения габаритных параметров амортизатора. При скорости вибрации 0,25 м/с, максимальная мощность, генерируемая амортизатором, составила 225 Вт.

L. Bowen и др. (2019) [14] исследовали в своей работе потенциал рекуперации энергии двух различных типов ротационных электромагнитных амортизаторов. Первый – амортизатор с шариковинтовой передачей энергии. Второй – амортизатор с кабельным динамическим сбором энергии, который в качестве основного элемента преобразования поступательного перемещения во вращательное движение использует стальной трос и пару шкивов. Разработаны динамические модели для исследуемых типов электромагнитных амортизаторов. Установлено, что при движении автомобиля по дорогам различного уровня обустроенности, рекуперированная мощность изменяется в диапазоне от 400 до 1200 Вт. Использование амортизатора с кабельным динамическим сбором энергии позволяет генерировать на 80-110 % больше энергии в сравнении другим исследуемым амортизатором.

J. Lee и др. (2021) [15] в своей работе исследовали процесс рекуперации энергии в подвеске автомобиля. Основными элементами такой подвески, являлись линейный электромагнитный генератор и синхронный понижающий преобразователь. Генерируемая электроэнергия могла передаваться в аккумулятор, а демпфирующая сила амортизатора регулировалась контролируемым током генератора. Кроме этого, ток батареи может контролироваться синхронным понижающим преобразователем и оказывает влияние на мощность генератора. Демпфирующие силы амортизатора регулируются по мере того, как он продолжает передавать генерируемую мощность. Предложенный алгоритм управления работой рекуперативной подвеской обеспечивает непрерывное питание аккумулятора независимо от положения и скорости генератора. Это устраняет необходимость в дорогостоящих датчиках позиционирования и измерения скорости. Установлено, что в исследуемом диапазоне колебаний, воспринимаемых при движении подвеской автомобиля, значение максимальной мощности генерируемой амортизатором изменяется, в диапазоне от 69 до 225 Вт.

S. Alhumaid и др. (2022) [16] в своей работе изучили возможность рекуперации энергии колебаний подвески путем использования амортизаторов с пьезоэлектрическими и электромагнитными преобразователями. Предложено пьезоэлектрическое

устройство позволяющее преобразовывать механическую энергию в полезную электрическую энергию. Пьезоэлектрические диски установлены между магнитными пластинами и внутренней поверхностью кольца статора. Пьезоэлектрическое устройство приводится в движение однонаправленным амортизатором, включающим вращательный механизм, состоящий из пары реек и шестерен. При вращении встроенные в амортизатор пьезоэлектрические элементы возбуждаются силами магнитного отталкивания или притяжения. Рассматриваемое пьезоэлектрическое устройство обладает прочной конструкцией, а также может надежно работать в широком диапазоне частот. Установлено, что исследуемая рекуперативная подвеска способна вырабатывать высокие и относительно устойчивые значения напряжений холостого хода независимо от частот возбуждения.

U. Jamolov и др. (2022) [17] в своей статье представили методологию проектирования узлов автомобилей методом конечных элементов, которую можно применять для усовершенствования и оптимизации рекуперативных электромагнитных амортизаторов подвески транспортного средства. Предлагаемый амортизатор имеет переменную, надежную демпфирующую силу, а электрическая энергия преимущественно регенерируется на высоких частотах подвески. Сравнение динамических характеристик автомобилей с предлагаемыми электромагнитными амортизаторами и с традиционными гидравлическими амортизаторами показало, что в исследуемом диапазоне скоростей индекс комфортности не изменился, индекс сцепления колес с дорогой ухудшился по причине более низкого коэффициента демпфирования. Регенеративный амортизатор может генерировать непрерывную мощность 15 Вт при движении автомобиля по ровной дороге со скоростью 35 км/ч, а также безопасно работать при неисправности электронной схемы, обеспечивая демпфирование колебаний в условиях короткого замыкания. Предлагаемый рекуперативный амортизатор в сравнении с традиционным гидравлическим амортизатором, является экологически безопаснее, а также предотвращает образование побочных продуктов при попадании рабочей жидкости в окружающее пространство.



J. A. Reyes-Avendano и др. (2021) [18] в своей работе рассмотрели вопрос о безопасности замены традиционных гидравлических амортизаторов в подвеске автомобиля рекуперативными амортизаторами с шарико-винтовыми передачами, обеспечивающими аналогичные характеристики демпфирования, а также возможность восстановления части энергии, непроизводительно рассеиваемой в окружающее пространство. Предложена конструкция рекуперативного амортизатора с механическим линейным приводом, позволяющая функционально воспроизводить динамическое поведение пассивного амортизатора за счет возможности активного воздействия на его рабочие параметры изменением сопротивления нагрузки.

J. Huang и др. (2020) [19] исследовали в своей статье магнитореологическую регенеративную систему подвески автомобиля, обеспечивающую при его движении в различных дорожных условиях улучшение комплексных характеристик подвески, а также эффективное восстановление и последующее использование потенциальной энергии вибрации. Такая подвеска обладает простой конструкцией, низким энергопотреблением, а также адаптируема к различным изменяющимся дорожным условиям. Разработана модель регенеративной системы подвески, оснащенной амортизаторами с трубчатым линейным двигателем на постоянных магнитах. Результаты моделирования показывают, что система регенеративной подвески с улучшенным управлением отвечает требованиям естественной резонансной частоты подвески транспортного средства, эффективно повышает комфорт вождения, а также обладает значительной регенеративной способностью.

A. Casavola и др. (2020) [20] в своей работе основное внимание уделили гибким многоцелевым стратегиям проектирования систем управления, позволяющим найти оптимальное решение между обычными показателями управляемости на дороге, комфортом езды, а также количеством генерируемой энергии. Предложена электромеханическая рекуперативная система подвески автомобиля, в которой каждый амортизатор оснащен линейным электродвигателем с активным управлением. Установлено, что активное управление рекуперативной подвеской автомобиля обеспечивает большее количество генерируемой энергии при идентичных требованиях к комфорту езды.

R. Zhang и др. (2018) [21] в своей статье разработали классификацию и выполнили оценку современных технологий регенеративных амортизаторов. Существующие технологии, используемые в регенеративных системах амортизатора, были подразделены на три типа в зависимости от механизмов преобразования: прямой привод, непрямой привод и гибридный привод. Ограничением использования регенеративных амортизаторов с прямым приводом является их массово-габаритные параметры. Основным ограничением регенеративного амортизатора с непрямым приводом является сложность механизма преобразования движения, оказывающая влияние на динамику движения автомобиля и на ухудшение управляемости. Установлено, что потенциал преобразования энергии колебаний подвески в электрическую энергию рекуперативным амортизатором позволяет существенно снизить расход топлива автомобильным транспортным средством. При рациональной системе управления достигаются оптимальные параметры динамических характеристик автомобиля и рекуперации электрической энергии амортизатором. Повышение эффективности рекуперативных амортизаторов достигается использованием магнитов и катушек больших размеров, а также осуществлением ими демпфирования, как на фазе сжатия, так и расширения при движении амортизатора.

X. Hu и др. (2019) [22] в своей работе выполнили оценку потенциала снижения вредных выбросов при движении автомобиля, оснащенного рекуперативной подвеской, генерируемой и накапливаемой в аккумуляторе электрической энергии. На основе разработанной модели получена связь между параметрами управления рекуперативной подвеской и образующимися в процессе движения автомобиля вредными выбросами. Для достижения наилучшей эффективности между динамическими характеристиками и экологическими показателями предложены два набора оптимальных параметров управления, а также рекомендации их использования в процессе эксплуатации автомобиля. Установлено, что рекуперативная подвеска дает возможность снизить количество вредных выбросов на 4,5 % от общего объема выбросов автомобилем при движении по обустроенной ровной дороге. Также выявлено, что с ухудшением уровня обустроенности дороги количество вредных выбросов значительно сокращается.

Ф. Коу и др. (2018) [23] исследовали с целью согласования характеристик демпфирования с параметрами рекуперации энергии предложенную конструкцию полуактивной рекуперативной подвески автомобиля с электрогидравлическим приводом. Установлено, что при подаче синусоидального сигнала с частотой 2 Гц и амплитудой 30 мм среднеквадратическое значение ускорения массы амортизатора оптимизированной полуактивной рекуперативной подвески снижается на 22,23 %, а рекуперативная мощность возрастает на 40,51 % при удовлетворении требований, предъявляемых к комфортности, устойчивости и безопасности движения автомобиля.

Приведенный выше анализ научных работ дает возможность сделать вывод, что потенциал современных разработок в области рекуперации энергии различными по конструкции амортизаторами, является достаточно значительным. Их практическое применение способствует снижению расхода топлива за счет генерирования электрической энергии, оптимизировать плавность движения, повысить комфортность, улучшить управляемость и ходовые качества автомобиля, изменять демпфирующие характеристики в зависимости от дорожных условий, а также снизить количество вредных выбросов при движении автомобиля. Несмотря на это, при проектировании таких амортизаторов, все еще возникают проблемные вопросы, направленные на: повышение эффективности генерирования электрической энергии такими амортизаторами; достижение совместимости применения с различными моделями автомобилей; уменьшение массовых и габаритных параметров; повышение коэффициента полезного использования; снижение стоимости изготовления; упрощение сложности конструкции; обеспечение более плавной работы; повышение надежности работы [24].

Результаты исследований, выполненные ранее, позволили предложить перспективные конструкции подвесок для лесовозного автомобиля-тягача с прицепом, оснащенных электромагнитными амортизаторами (рис. 1). Устанавливаемые в подвеске автопоезда рекуперативные электромагнитные амортизаторы на постоянных магнитах обладают высокой надежностью, а также увеличенной

производительностью генерирования электрической энергии. При неустановившихся режимах движения лесовозного автопоезда, в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог, закрепленные на подвеске автопоезда рекуперативные амортизаторы совершают возвратно-поступательные перемещения в вертикальной плоскости. Это сопровождается генерированием электрической энергии, ее накоплением в аккумуляторной батарее с последующим полезным использованием для питания приборов и систем лесовозного автомобиля-тягача [25].

Целью работы является повышение энергоэффективности лесовозного автопоезда, за счет использования в его подвеске разработанных рекуперативных электромагнитных амортизаторов, обеспечивающих повышения производительности генерирования электрической энергии. Цель работы достигается за счет применения имитационного моделирования, позволяющего исследовать работу рекуперативных электромагнитных амортизаторов, установленных в подвесках лесовозного автомобиля-тягача с прицепом.

### **Материалы и методы**

#### *Предмет и объект исследования*

Объектом исследования в данной работе является процесс генерирования электрической энергии рекуперативными амортизаторами, установленными в подвесках лесовозного автомобиля-тягача с прицепом.

В качестве предмета исследования выступают закономерности влияния конструктивных параметров исследуемых рекуперативных электромагнитных амортизаторов, параметров опорной поверхности лесовозной дороги и условий движения лесовозного автопоезда на показатели эффективности функционирования рекуперативной подвески лесовозного автомобиля-тягача с прицепом.

#### *Дизайн эксперимента или сбор данных*

Для оценки эффективности предлагаемой конструкции рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах разработана математическая модель. Подсистема, описывающая движение автопоезда по поверхности лесовозной дороги с изменяющимися в широком диапазоне параметрами ее обустроенности аналогична подсистеме математической модели, разработанной авторами ранее в работе [3].

В рамках этой математической модели автопоезд представлен как два перемещающихся в трех-

мерном пространстве абсолютно твердых тела, контактирующих с поверхностью дороги упруго-вязким взаимодействием (рис. 2).

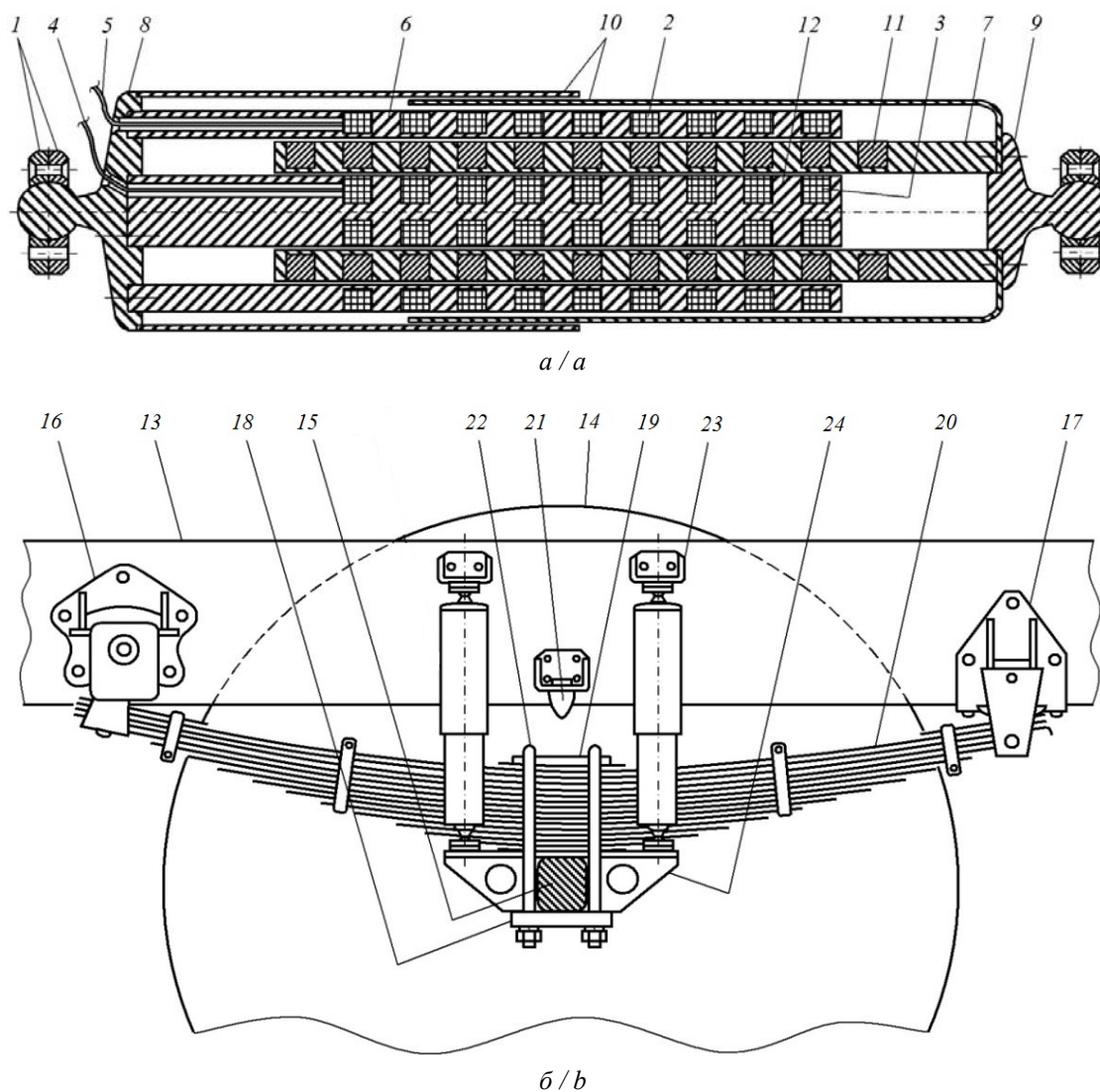


Рисунок 1. Перспективная конструкция подвески лесовозного автомобиля-тягача с прицепом, оснащенная электромагнитными амортизаторами: *a* – схема электромагнитного амортизатора; *б* – схема размещения амортизаторов в подвеске лесовозного автопоезда; 1 – фланцы; 2, 3 – внешняя и внутренняя обмотки; 4, 5 – выводы внутренних и внешних обмоток; 6, 7 – неподвижный и подвижный цилиндры; 8, 9 – крышки; 10 – защитные кожухи; 11 – постоянный кольцевой магнит; 12 – стержень; 13 – рама лесовозного автопоезда; 14 – колесо; 15 – балка моста; 16, 17 – передний и задний кронштейны рессоры; 18, 19 – накладки; 20 – рессора; 21 – буфер; 22 – стремянка; 23, 24 – верхний и нижний кронштейны крепления электромагнитного амортизатора

Figure 1. A promising suspension design for a timber tractor-trailer equipped with electromagnetic shock absorbers: *a* – diagram of an electromagnetic shock absorber; *b* – arrangement of shock absorbers in the suspension logging road train; 1 – flanges; 2, 3 – external and internal windings; 4, 5 – conclusions of internal and external windings; 6, 7 – show fixed and movable cylinders; 8, 9 – covers; 10 – protective casings; 11 – permanenta ring magnet; 12 – rod; 13 – frame of the timber truck train; 14 – wheel ;15 – axle beam; 16, 17 – front and rear spring brackets; 18, 19 – pads; 20 – spring; 21 – buffer; 22 – stepladder; 23, 24 – upper and lower brackets of electromagnetic shock-absorber attachment

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

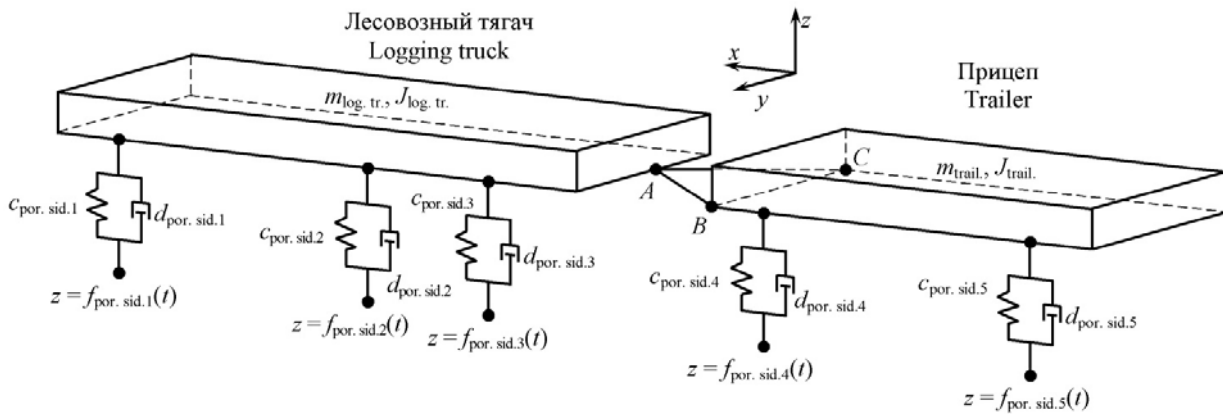


Рисунок 2. Расчетная схема автопоезда, звенья которого оснащены рекуперативными электромагнитными амортизаторами на постоянных магнитах

Figure 2. Design diagram of a timber tractor-trailer with a trailer, equipped with regenerative electromagnetic shock absorbers

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

При моделировании работы рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах использовался численный сеточный метод, при котором на сетке размером  $200 \times 200$  узлов распределяли кольцевые магниты, каждый из которых в осевом сечении задавался двумя прямоугольниками (рис. 3).

Для расчета поля вектора магнитной индукции используется предположение, что в каждом узле  $(i, j)$  сетки, принадлежащей магниту, течет элементарный ток  $I_{ij}$  в перпендикулярном к плоскости моделирования направлении. В этом случае расчет поля вектора магнитной индукции  $(B_{ix}, B_{iy})$  производится в приближении бесконечного прямолинейного проводника:

$$\begin{cases} B_{ix} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^{200} \sum_{p=1}^{200} \frac{M_{kp}}{(i-k)^2 + (j-p)^2} (p-j); \\ B_{iy} = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \cdot \sum_{k=1}^{200} \sum_{p=1}^{200} \frac{M_{kp}}{(i-k)^2 + (j-p)^2} (i-k), \end{cases} \quad (1)$$

где  $i, j$  – индексы узла, в которых рассчитываются компоненты  $B_{ix}, B_{iy}$  вектора магнитной индукции;  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Тл·м/А);  $I_0$  – элементарный ток области магнита, принадлежащей одному узлу;  $k, p$  – индексы суммирования по всем узлам сетки;  $M_{kp}$  – матрица размером  $200 \times 200$ , содержащая информацию о магните, элементы которой могут принимать три значения: 0, если в данном узле нет магнита, 1 или  $-1$ , если в данном узле есть

магнит, и элементарный ток направлен в одну или другую сторону.

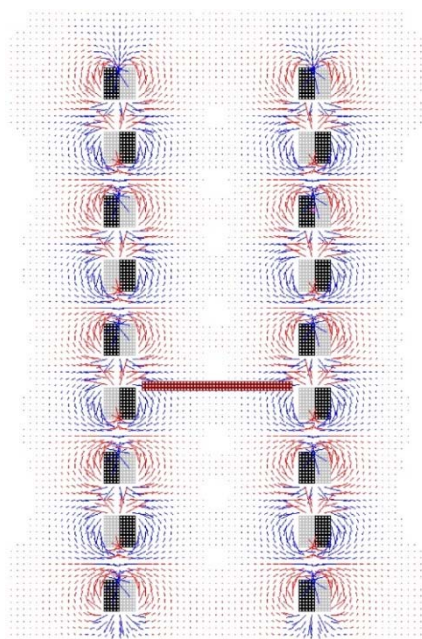


Рисунок 3. Представление в разработанной модели кольцевых магнитов, магнитного поля и единичного витка обмотки

Figure 3. Representation in the developed models of ring magnets, magnetic field and single winding turn

Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

После расчета магнитного поля в модели имитируется движение одного витка обмотки вдоль оси магнита и оценивается электродвижущая сила индукции  $\varepsilon$  по закону Фарадея:

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток через виток обмотки;  $t$  – время.

С учетом численного метода расчета формула Фарадея записывается следующим образом:

$$\varepsilon_j = \frac{v}{d} \cdot k_{II} \cdot \sum_{i=100-R}^{100+R} (|i-100| (B_{ijy} - B_{i,j-1,y})), \quad (3)$$

где  $\varepsilon_i$  – зависимость электродвижущей силы от продольной осевой координаты рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах;  $v$  – скорость движения витка в осевом направлении;  $d$  – шаг сетки;  $k_{II}$  – коэффициент пропорциональности;  $R$  – радиус витка, выраженный в целом количестве узлов сетки;  $i = 100$  – положение оси рекуперативного амортизатора.

Разработанная модель позволила исследовать зависимость электродвижущей силы от времени  $\varepsilon(t)$  при движении единичного витка обмотки вдоль оси рекуперативного амортизатора (рис. 4). На основе сравнительного анализа зависимостей  $\varepsilon(t)$  были выбраны оптимальное количество, полярность и геометрические параметры кольцевых магнитов.

Основная характеристика предлагаемых рекуперативных электромагнитных амортизаторов на постоянных магнитах, рассчитываемая при проведении компьютерных экспериментов должна позволять оценивать эффективность процесса преобразования и накопления энергии. В этой связи, в качестве такой характеристики принималась рекуперированная электрическая мощность.

На каждом шаге численного интегрирования расчет значения рекуперированной мощности  $P_{rec. el. pow.}$  выполнялся следующим образом:

$$P_{rec. el. pow.}(t) = \frac{U_{rec.}}{R_{load}}, \quad (4)$$

где  $U_{rec.}$  – напряжение, создаваемое системой

рекуперативных электромагнитных амортизаторов на постоянных магнитах;  $R_{load}$  – электрическое сопротивление нагрузки, включенной в сеть, либо внутреннее сопротивление аккумулятора при накоплении энергии.

Зная электродвижущую силу индукции  $\varepsilon$  и суммарное сопротивление обмоток и нагрузки  $R$ , мгновенная мощность рекуперативного электромагнитного амортизатора, определялась по формуле:

$$P_{aver.}(t) = \frac{(\varepsilon(t) - U)^2}{R}, \quad (5)$$

где  $U$  – плавающий средний уровень напряжения, обеспечиваемый RC-фильтром.

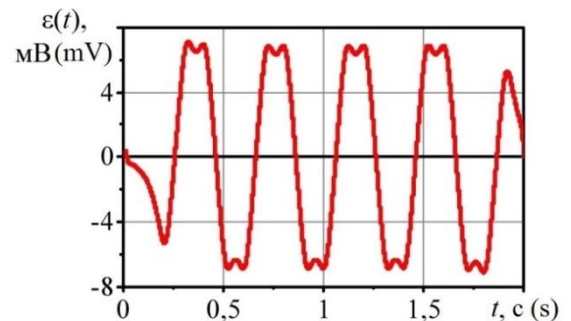


Рисунок 4. Зависимость электродвижущей силы от времени  $\varepsilon(t)$  при движении одного витка обмотки вдоль системы из восьми кольцевых магнитов с чередующейся полярностью

Figure 4. Dependence of electromotive force on time  $\varepsilon(t)$  at movement of one winding turn along the system of eight ring magnets with alternating polarity

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

Для исследования математической модели разработана программа для ЭВМ, позволяющая имитировать работу рекуперативных электромагнитных амортизаторов на постоянных магнитах, установленных в подвесках лесовозного автомобиля-тягача с прицепом. Интерфейсная формы вывода результатов моделирования на экран компьютера, приведена на рис. 5.

При исследовании разработанной модели варьировали более 10 основными параметрами модели, и контролировали эффективность системы рекуперации по одному выходному показателю (рис. 6).

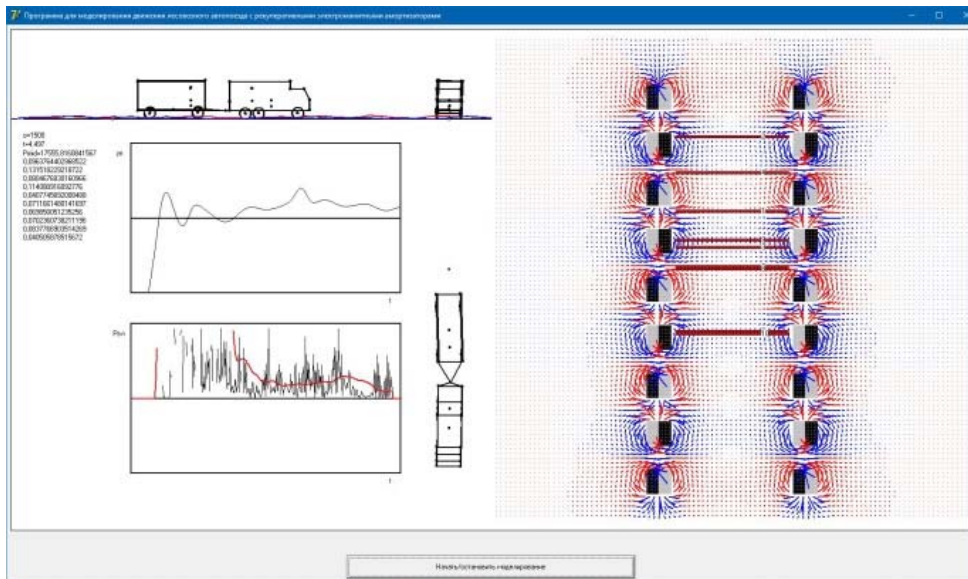


Рисунок 5. Интерфейсная формы вывода результатов моделирования на экран компьютера

Figure 5. Interface form for displaying simulation results on the computer screen

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

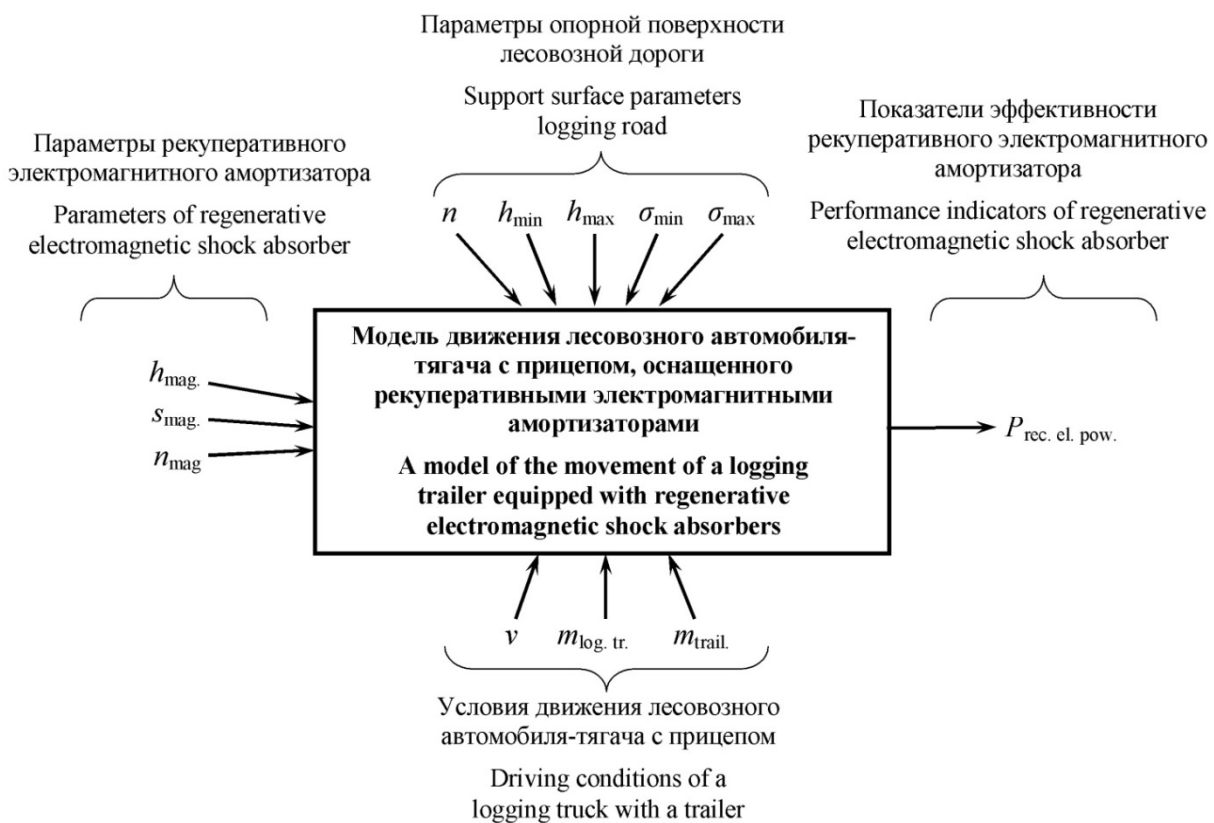


Рисунок 6. Входные и выходные параметры модели

Figure 6. Model input and output parameters

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Все исследуемые входные параметры разделены на три группы. Первая группа –  $h_{\text{mag}}$  – высота кольцевых постоянных магнитов;  $s_{\text{mag}}$  – расстояние между кольцевыми постоянными магнитами при их последовательной установке в амортизаторе;  $n_{\text{mag}}$  – количество кольцевых магнитов. Вторая группа –  $m_{\text{log.tr.}}$  – масса лесовозного автомобиля-тягача;  $m_{\text{trail}}$  – масса прицепа. Третья группа:  $n$  – линейная плотность неровностей, имеющих на лесовозной дороге;  $h_{\text{min}}$  и  $h_{\text{max}}$  – минимальная и максимальная высоты неровностей;  $\sigma_{\text{min}}$  и  $\sigma_{\text{max}}$  – мини-

мальная и максимальная длины неровностей. Эффективность рекуперативных электромагнитных амортизаторов на постоянных магнитах оценивается значением рекуперированной электрической мощности  $P_{\text{rec. el. pow.}}$ .

## Результаты

В компьютерных экспериментах изменяли значение высоты  $h_{\text{mag}}$  кольцевых магнитов на уровнях 20, 30, 40 мм и расстояние между магнитами  $s_{\text{mag}}$  на уровнях 0, 15, 30 мм (рис. 7). Обнаружено, что наиболее оптимальными являются параметры  $h_{\text{mag}} = 20$  мм,  $s_{\text{mag}} = 15$  мм.

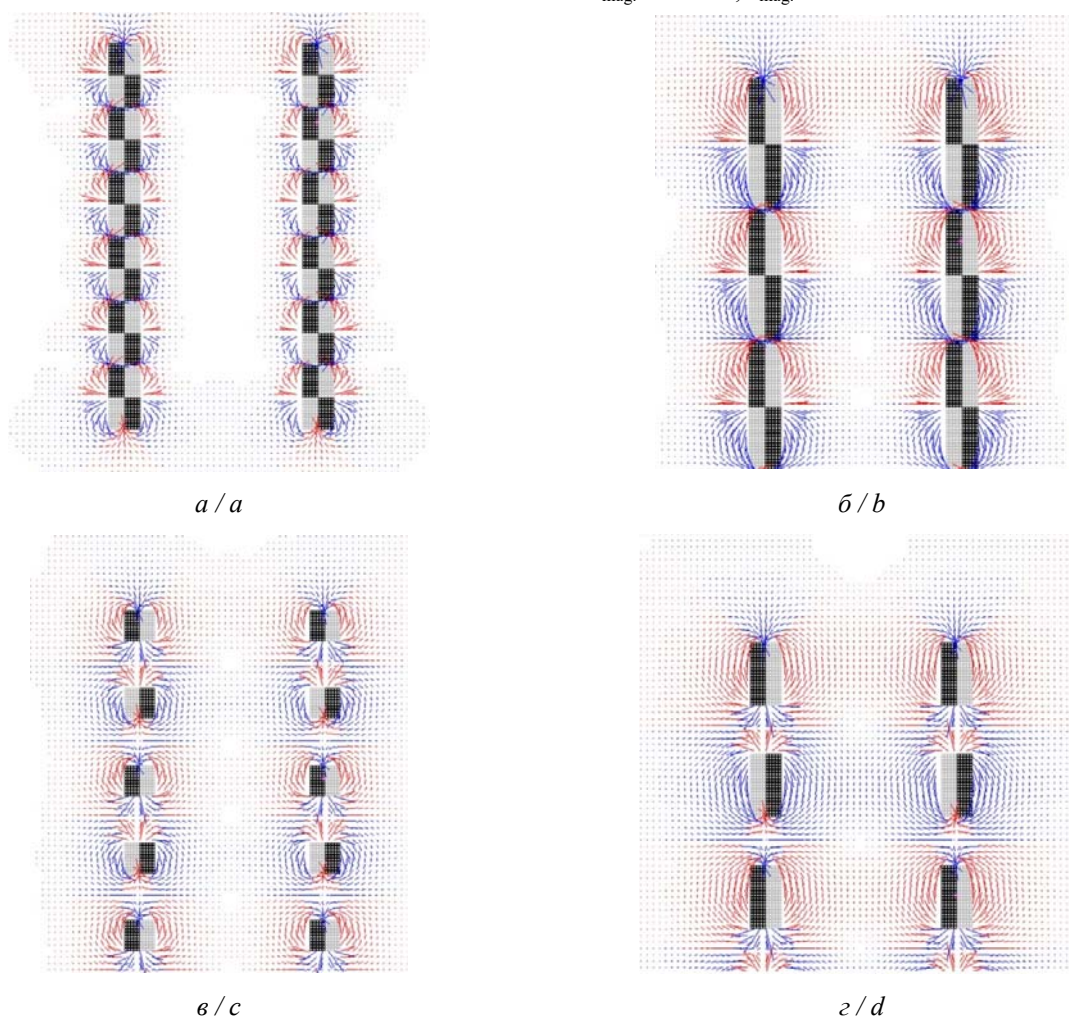


Рисунок 7. Исследуемые наборы кольцевых постоянных магнитов рекуперативного электромагнитного амортизатора:  $a - h_{\text{mag}} = 20$  мм,  $s_{\text{mag}} = 0$  мм;  $б - h_{\text{mag}} = 40$  мм,  $s_{\text{mag}} = 0$  мм;  $в - h_{\text{mag}} = 20$  мм,  $s_{\text{mag}} = 30$  мм;  $г - h_{\text{mag}} = 40$  мм,  $s_{\text{mag}} = 30$  мм

Figure 7. The studied sets of ring permanent magnets of a regenerative electromagnetic shock absorber:  $a - h_{\text{mag}} = 20$  мм,  $s_{\text{mag}} = 0$  мм;  $b - h_{\text{mag}} = 40$  мм,  $s_{\text{mag}} = 0$  мм;  $c - h_{\text{mag}} = 20$  мм,  $s_{\text{mag}} = 30$  мм;  $d - h_{\text{mag}} = 40$  мм,  $s_{\text{mag}} = 30$  мм

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

В процессе неустановившегося движения автопоезда по неровностям поверхности лесовозной дороги шток в рекуперативном электромагнитном амортизаторе совершает случайные возвратно-поступательные движения (рис. 8, а). Для исследования колебаний штока в рекуперативном амортизаторе использовали разработанную ранее модель движения автопоезда по опорной поверхности дороги. При движении штока в рекуперативном амортизаторе шесть его обмоток перемешались относительно восьми кольцевых постоянных магнитов, что способствовало возникновению всплесков электродвижущей силы индукции (рис. 8, б).

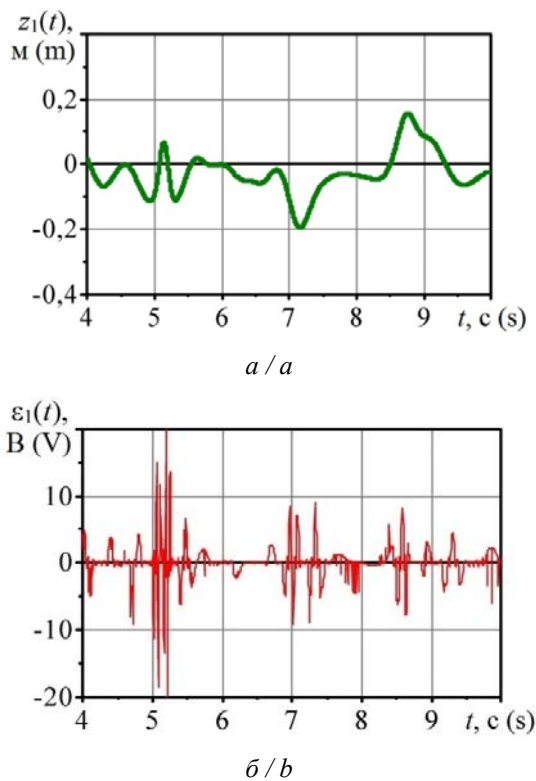


Рисунок 8. Зависимость от времени  $t$  координаты штока внутри одного рекуперативного электромагнитного амортизатора  $z_1(t) - a$  и электродвижущей силы индукции в данном амортизаторе  $\varepsilon_1(t) - б$

Figure 8. Dependence on time  $t$  of rod coordinate inside one regenerative electromagnetic shock absorber  $z_1(t) - a$  and electromotive force of induction in this shock absorber  $\varepsilon_1(t) - b$

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

На полученной зависимости  $P_1(t)$  одного рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах можно выделить множество пиков длительностью порядка 0,02 с (рис. 9, а).

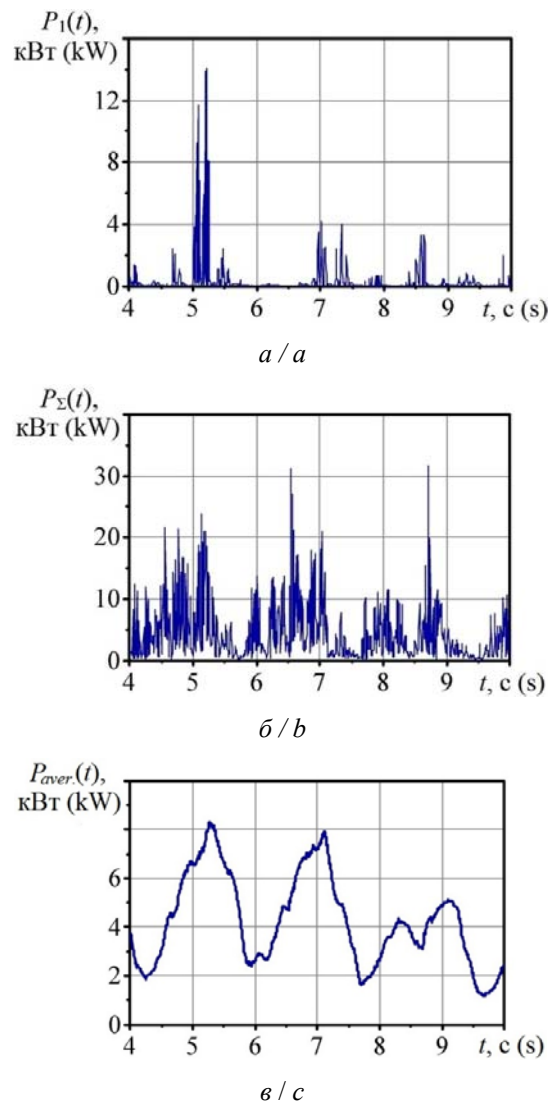


Рисунок 9. Зависимость изменения от времени  $t$  значения электрической мощности, вырабатываемой одним рекуперативным амортизаторами  $P_1(t) - a$ , десятью амортизаторами  $P_\Sigma(t) - б$  и электрической мощности после сглаживания  $RC$ -фильтром  $P_{aver}(t) - в$

Figure 9. Change versus time  $t$  electric power values, generated by one regenerative shock absorbers  $P_1(t) - a$ , ten shock absorbers  $P_\Sigma(t) - b$  and electric power downstream smoothing by  $RC$ -filter  $P_{aver}(t) - c$

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations



При одновременном потреблении мощности от шести рекуперативных амортизаторов зависимость мгновенной мощности от времени представляет собой множество узких пиков (рис. 9, б). Для сглаживания генерируемой электрической мощности может быть использован дополнительный RC-фильтр, на выходе которого получается мощность 4,2 кВт (рис. 9, в).

С увеличением высоты неровностей  $h_{\text{unev}}$  опорной поверхности лесовозной дороги возрастает амплитуда перемещения обмоток рекуперативного электромагнитного амортизатора относительно постоянных магнитов. Это приводит к более интенсивному изменению магнитного потока через катушки, и соответственно к увеличению электродвижущей силы и генерируемой амортизатором электрической мощности. Для изучения влияния средней высоты неровностей  $h_{\text{unev}}$  опорной поверхности лесовозной дороги проведена серия из 11 компьютерных экспериментов, в которых высота неровностей  $h_{\text{unev}}$  варьировалась в диапазоне от 0 до 1 м с шагом 0,1 м. Скорость лесовозного автопоезда при этом была постоянной, и составляла 20 км/ч.

Выявлено, что с увеличением высоты неровностей  $h_{\text{unev}}$  на поверхности моделируемой дороги графики  $P_{\text{aver.}}(t)$  изменяются по абсолютной величине, но практически не изменяются по форме (рис. 10).

Зависимость изменения рекуперированной электрической мощности  $P_{\text{rec. el. pow.}}$  от высоты неровностей  $h_{\text{unev}}$  опорной поверхности является практически линейной: при изменении высоты неровностей  $h_{\text{unev}}$  от 0,1 до 0,9 м рекуперированная электрическая мощность  $P_{\text{rec. el. pow.}}$  увеличивается с 0,34 до 10,5 кВт (рис. 11, а). При движении лесовозного автопоезда со скоростью 20 км/ч по неровностям опорной поверхности малой высоты  $h_{\text{unev}} = 0 \dots 0,2$  м, рекуперативные электромагнитные амортизаторы позволяют генерировать ограниченную мощность  $P_{\text{rec. el. pow.}}$ , не превышающую 1,35 кВт. При высоте неровностей  $h_{\text{unev}}$  опорной поверхности лесовозной дороги – 0,4 ... 0,6 м рекуперативные амортизаторы позволяют генерировать мощность  $P_{\text{rec. el. pow.}}$  в диапазоне от 4,2 до 6,8 кВт.

При увеличении скорости движения  $v$  лесовозного автомобиля-тягача с прицепом можно ожидать

увеличения частоты колебательных перемещений обмоток относительно постоянных магнитов.

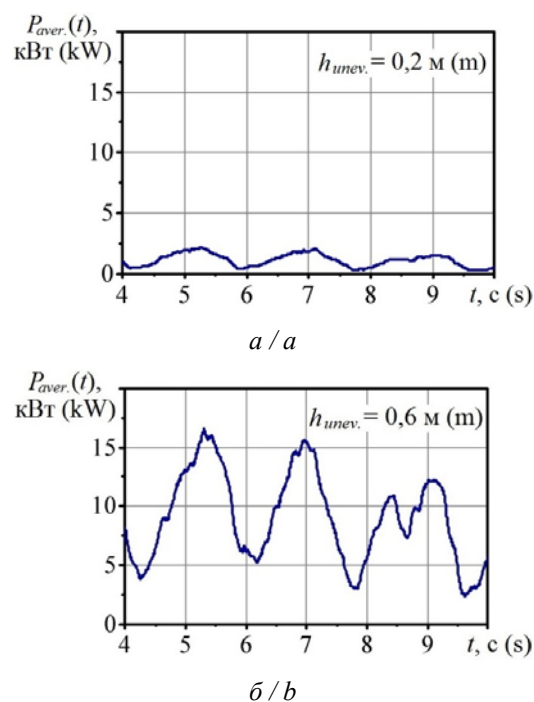


Рисунок 10. Зависимости от времени  $t$  суммарной электрической мощности после сглаживания RC-фильтром  $P_{\text{aver.}}(t)$  для случаев средней высоты неровностей 0,2 м – а и 0,6 м – б  
Figure 10. Dependences of the total electrical power on time  $t$  after smoothing with an RC filter  $P_{\text{aver.}}(t)$  for cases of average height of irregularities of 0.2 m – a and 0.6 m – b

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

Это приводит к увеличению скорости изменения магнитного потока через обмотки, и к росту генерируемой электродвижущей силы и, соответственно, электрической мощности  $P_{\text{rec. el. pow.}}$ . Для изучения влияния скорости  $v$  движения автопоезда производили ее изменение от 0 до 50 км/ч с шагом 5 км/ч. При этом средняя высота неровностей  $h_{\text{unev}}$  составляла 0,4 м.

#### Обсуждение

Обнаружено, что зависимость рекуперированной электрической мощности  $P_{\text{rec. el. pow.}}$  при увеличении скорости  $v$  движения автопоезда носит квадратичный характер (рис. 11, б). При увеличении скорости  $v$  движения от 10 до 30 км/ч рекуперированная

электрическая мощность  $P_{rec. el. pow.}$  существенно возрастает с 1,17 до 7,94 кВт.

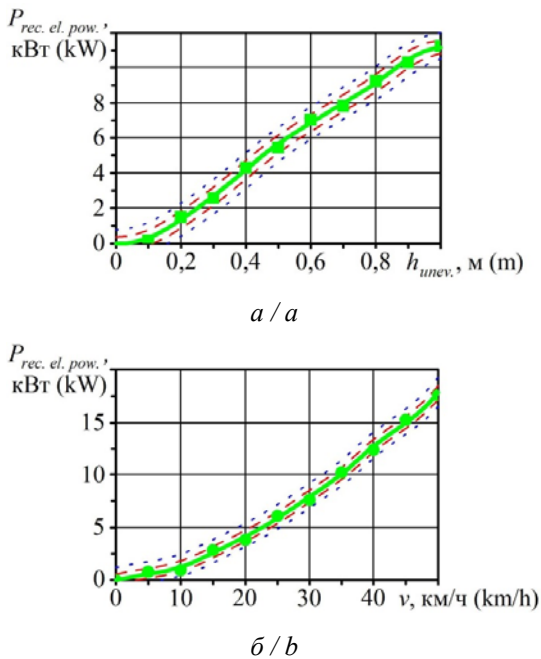


Рисунок 11. Зависимости средней рекуперированной мощности  $P_{rec.el.pow.}$  от средней высоты неровностей  $h_{unev.}$  – а и от скорости движения автопоезда  $v$  – б

Figure 11.  $P_{rec.el.pow.}$  average recoverable capacity from the average height of the irregularities  $h_{unev.}$  – а and from the speed of the road train  $v$  – б

Источник: собственные вычисления авторов  
Source: authors' own calculations

Установлено, что эффективность при работе исследуемых рекуперативных амортизаторов достигается при движении автопоезда при диапазоне скоростей от 20 до 30 км/ч. При этом генерируемая амортизаторами рекуперированная электрическая мощность  $P_{rec. el. pow.}$  изменяется в диапазоне от 4,2 до 7,94 кВт.

Проведенная работа вносит значительный вклад в разработку рекуперативных подвесок применительно к традиционным, гибридным автомобильным транспортным средствам, а также к электромобилям. Последующее исследование будет учитывать влияние на изменение рекуперированной мощности движения лесовозного автопоезда при прохождении поворотов, с ускорениями, торможениями. Кроме этого, исследование будет включать экспериментальную проверку полученных на основе компьютерных экспериментов зависимостей.

## Выводы

Проведенный анализ опубликованных российских и зарубежными исследователями научных статей позволяет сделать вывод, что потенциал современных разработок в области рекуперации электрической энергии различными по конструкции амортизаторами, является достаточно значительным. Несмотря на это, при проектировании таких амортизаторов, все еще возникают проблемные вопросы, решение которых направлено на: повышение эффективности генерирования электрической энергии; достижение совместимости применения с различными моделями автомобилей; уменьшение массовых и габаритных параметров; повышение коэффициента полезного использования; снижение стоимости изготовления; упрощение сложности конструкции; обеспечение их более плавной работы; повышение надежности работы. Для повышения надежности работы рекуперативных амортизаторов, а также увеличения производительности генерирования ими электрической энергии, предложена перспективная конструкция рекуперативного электромагнитного амортизатора на постоянных магнитах.

Для исследования математической модели разработана программа для ЭВМ, позволяющая имитировать работу рекуперативных электромагнитных амортизаторов на постоянных магнитах, установленных в подвесках лесовозного автомобиля-тягача с прицепом. Зависимости средней рекуперированной мощности при увеличении высоты неровностей и повышении скорости движения автопоезда получены на основании аппроксимации методом наименьших квадратов полиномом второго порядка. При этом статистическая достоверность границ доверительного интервала составила 0,95, а статистическая надежность границ интервала прогнозирования – 0,95.

Установлено, что при движении лесовозного автомобиля-тягача с прицепом со скоростью 20 км/ч по случайной неровной опорной поверхности лесовозной дороги рекуперативные амортизаторы генерируют 4,2 кВт электрической мощности. Полученная зависимость рекуперированной мощности от высоты неровностей опорной поверхности является практически линейной: при изменении высоты не-

ровностей от 0,1 до 0,9 м рекуперированная электрическая мощность увеличивается с 0,34 до 10,5 кВт.

При движении лесовозного автопоезда со скоростью 20 км/ч по неровностям опорной поверхности малой высоты – 0 ... 0,2 м, рекуперативные электромагнитные амортизаторы позволяют генерировать ограниченную мощность, не превышающую 1,35 кВт. При высоте неровностей опорной поверхности – 0,4 ... 0,6 м рекуперативные амортизаторы позволяют генерировать мощность в диапазоне от 4,2 до 6,8 кВт.

Также выявлено, что зависимость рекуперированной электрической мощности от скорости движения лесовозного автопоезда носит квадратичный

характер. При увеличении скорости движения от 10 до 30 км/ч рекуперированная электрическая мощность увеличивается с 1,17 до 7,94 кВт. Достижение эффективной работы исследуемых амортизаторов происходит только, начиная со скорости движения лесовозного автомобиля-тягача с прицепом от 20 до 30 км/ч. При этом генерируемая амортизаторами рекуперированная электрическая мощность изменяется в диапазоне от 4,2 до 7,94 кВт.

### Список литературы

1. Посметьев, В. И. Оценка актуальности использования рекуперативной подвески с линейным электромагнитным генератором в конструкции лесовозного автомобиля / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. А. Зеликов // Воронежский научно-технический вестник. – 2022. – Т. 2, № 2 (40). – С. 50-63. – Библиогр. : с. 60-61 (27 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-50-63>
2. Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного сцепного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. В. Посметьев, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13, № 1(49). – С. 162-179. – Библиогр. : с. 176-177 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>
3. Посметьев, В. И. Обоснование целесообразности оснащения лесовозных автопоездов рекуперативными тягово-сцепными устройствами по результатам имитационного моделирования : монография / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2023. – 204 с. – Библиогр. : с. 185-203 (141 назв.). URL : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61082376>.
4. Оптимизация конструктивных параметров пневмогидравлического седельно-сцепного устройства лесовозного автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. Ю. Мануковский, В. В. Посметьев, А. В. Авдюхин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2023. – № 3(393). – С. 126-139. – Библиогр. : с. 137-139 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-126-139>.
5. Борисов, В. А. Некоторые вопросы прочности сцепки тягача и полуприцепа-ропуски лесовозного автопоезда / В. А. Борисов, Д. В. Акинин, В. В. Никитин // Resources and Technology. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 12-23. – Библиогр. : с. 21-22 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4702>.
6. Верификация экспериментами моделей скорости движения лесовозов в зависимости от природно-производственных факторов / А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников, П. М. Мазуркин, Н. А. Брагина // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 108-115. – Библиогр. : с. 113 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-108-115>.
7. Мазуркин, П. М. Рейтинги групп факторов вывозки сортиментов / П. М. Мазуркин, А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников // Resources and Technology. – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 37-52. – Библиогр. : с. 50-51 (12 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5803>.
8. Мохирев, А. П. Закономерности ранговых распределений факторов вывозки древесины с лесных участков / А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников, П. М. Мазуркин // Лесной вестник / Forestry Bulletin. – 2021. – Т. 25, № 4. С. 112-120. – Библиогр. : с. 117-118 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-4-112-120>.

9. Fractional Order PID Control Based on Ball Screw Energy Regenerative Active Suspension / Zhang J., Liu J., Liu B., Li M. // *Actuators*. 2022, 11(7), 189. – Bibliogr. : pp. 22-23 (31 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/act11070189> (SNIP 0,975).
10. Damping Performance Analysis of Magnetorheological Damper Based on Multiphysics Coupling / Hu G., Wu L., Deng Y., Yu L., Luo B. // *Actuators*, 2021; 10(8), 176. – *Bibliogr.* : pp. 22-23 (30 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/act10080176> (SNIP 0,975)
11. Song H. Research on Inertial Force Attenuation Structure and Semi-Active Control of Regenerative Suspension / Song H., Dong M., Wang X. // *Applied Sciences*, 2024, 14(6), 2314. – *Bibliogr.* : pp. 19-20 (31 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app14062314> (SNIP 0,573).
12. Jia Y. An Analytical and Numerical Study of Magnetic Spring Suspension with Energy Recovery Capabilities / Jia Y., Li S., Shi Y. // *Energies*, 2018, 11(11), 3126. – *Bibliogr.* : pp. 14-15 (35 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113126> (SNIP 1,025).
13. Duong M.-T. Design of a High-Performance 16-Slot 8-Pole Electromagnetic Shock Absorber Using a Novel Permanent Magnet Structure / Duong M.-T., Chun Y.-D., Hong D.-K. // *Energies*, 2018, 11(12), 3352. – *Bibliogr.* : pp. 11-12 (25 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en11123352> (SNIP 1,025).
14. Bowen L. Design and Potential Power Recovery of Two Types of Energy Harvesting Shock Absorbers / Bowen L., Vinolas J., Olazagoitia J. L. // *Energies*, 2019, 12(24), 4710. – *Bibliogr.* : pp. 17-19 (42 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en12244710> (SNIP 1,025).
15. An Energy-Harvesting System Using MPPT at Shock Absorber for Electric Vehicles / Lee J., Chun Y., Kim J., Park B. // *Energies*, 2021, 14(9), 2552. – *Bibliogr.* : pp. 12-14 (31 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092552> (SNIP 1,025).
16. Alhumaid S. A Noncontact Magneto-Piezo Harvester-Based Vehicle Regenerative Suspension System: An Experimental Study / Alhumaid S., Hess D., Guldiken R. // *Energies*, 2022, 15(12), 4476. – *Bibliogr.* : pp. 15-17 (46 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124476> (SNIP 1,025).
17. Jamolov U. Multiphysics Design of an Automotive Regenerative Eddy Current Damper / Jamolov U., Peccini F., Maizza G. // *Energies*, 2022, 15(14), 5044. – *Bibliogr.* : pp. 17-18 (37 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en15145044> (SNIP 1,025).
18. Can a Semi-Active Energy Harvesting Shock Absorber Mimic a Given Vehicle Passive Suspension? / Reyes-Avenidaño J. A., Moreno-Ramírez C., Gijón-Rivera C., Gonzalez-Hernandez H. G., Olazagoitia J. L. // *Sensors*. 2021, 21(13), 4378. – *Bibliogr.* : pp. 16-17 (34 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134378> (SNIP 1,317).
19. Huang J. Analysis and Research on the Comprehensive Performance of Vehicle Magnetorheological Regenerative Suspension / Huang J., Wang E., Zhang H. // *Vehicles*, 2020, 2(4), 576-588. – *Bibliogr.* : pp. 587-588 (14 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles2040033> (SNIP 0,955).
20. Casavola A. Optimal Control Strategies for Energy Harvesting by Regenerative Shock Absorbers in Cars / Casavola A., Tedesco F., Vaglica P. // *Vibration*, 2020, 3(2), 99-115. – *Bibliogr.* : pp. 115 (15 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/vibration3020009> (SNIP 1,95).
21. Zhang R. Comprehensive Review of the Techniques on Regenerative Shock Absorber Systems / Zhang R., Wang X., John S. // *Energies*, 2018, 11(5), 1167. – *Bibliogr.* : pp. 37-43 (145 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051167> (SNIP 1,025).
22. Considering Well-to-Wheels Analysis in Control Design: Regenerative Suspension Helps to Reduce Greenhouse Gas Emissions from Battery Electric Vehicles / Hu X., Sun J., Chen Y., Liu Q., Gu L. // *Energies*, 2019, 12(13), 2594. – *Bibliogr.* : pp. 18-19 (37 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132594> (SNIP 1,025).
23. Nonlinear Modeling and Coordinate Optimization of a Semi-Active Energy Regenerative Suspension with an Electro-Hydraulic Actuator / Kou F., Du J., Wang Z., Li D., Xu J. // *Algorithms*, 2018, 11(2), 12. – *Bibliogr.* : pp. 16-17 (24 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/a11020012> (SNIP 0,913).

24. Посметьев, В. И. Анализ конструкций электромагнитных амортизаторов, рекуперующих энергию в подвесках автомобилей / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. С. Сеницын // Проблемы эксплуатации и перспективы развития автомобильного транспорта : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Воронеж, 05-06 октября 2023 года / отв. редактор В.О. Никонов. – Воронеж, 2023. – С. 31-44. – Библиогр. : с. 41-44 (30 назв.). – DOI: [https://doi.org/10.58168/OPPRTD\\_31-44](https://doi.org/10.58168/OPPRTD_31-44). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54789870>.

25. Патент № 2799872 Российская Федерация, МПК F16F 15/03, B60G 13/14, H02K 41/02. Рекуперативный амортизатор на основе линейного электродвигателя с постоянными магнитами : № 2023105791 : заявл. 13.03.2023 : опубл. 13.07.2023 / Д. В. Миронов, Р. Н. Хамитов, В. И. Посметьев, В. О. Никонов, А. П. Проговоров, И. В. Матери, С. В. Рослов, А. С. Мирончик ; заявитель Миронов Д. В., Проговоров А. П. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54203825>.

### References

1. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Zelikov V. A. *Oценка aktualnosti ispolzovaniya rekuperativnoi podveski s lineinim elektromagnitnim generatorom v konstrukcii lesovoznogo avtomobilya* [Assessing the relevance of using a regenerative suspension with a linear electromagnetic generator in the design of a timber truck]. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. – 2022. – Т. 2, № 2 (40). – P. 50-63. DOI: <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-50-63> (In Russ.).

2. Nikonov V. O., Posmetev V. I., Zelikov V. A., Posmetev V. V., Chujkov A. S. *Optimizaciya konstruktivnyh parametrov rekuperativnogo scepного ustrojstva, ustanovlennogo v lesovoznom avtomobile s pricepom* [Optimization of design parameters of a regenerative coupling device installed in a timber truck with a trailer]. *Forestry journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 1 (49). – S. 162-179. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11> (In Russ.).

3. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. *Obosnovanie celesoobraznosti osnascheniya lesovoznih avtopoezdov rekuperativnimi tyagovo-scepными ustroystvami po rezultatam imitacionnogo modelirovaniya* [Justification of the feasibility of equipping timber hauling road trains with regenerative towing devices based on the results of simulation modeling]: monography. – Voronezh, 2023. – 204 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=61082376>.

4. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Manukovskij A. Yu., Posmetev V. V., Avdyuhin A. V. *Optimizaciya konstruktivnyh parametrov pnevmogidravlichesкого sedel'no-scepного ustrojstva lesovoznogo avtopoezda* [Optimization of design parameters of a pneumohydraulic fifth wheel coupling device for a timber road train]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. – 2023. – #. 3(393). – pp. 126-139. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-126-139> (In Russ.).

5. Borisov V. A., Akinin D. V., Nikitin V. V. *Nekotorye voprosy prochnosti scepki tyagacha i polupriceparospuska lesovoznogo avtopoezda* [Some issues of the strength of the coupling of a tractor and a semi-trailer-dissolution of a timber road train]. *Resources and Technology*. – 2019. – Т. 16, №. 3. – P. 12-23. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4702> (In Russ.).

6. Mokhirev A. P., Rukomoinikov K. P., Mazurkin P. M., Bragina N. A. *Verifikaciya eksperimentami modelej skorosti dvizheniya lesovozov v zavisimosti ot prirodno-proizvodstvennyh faktorov* [Verification by experiments of models of the speed of movement of timber trucks depending on natural and production factors]. *Forestry Bulletin*. – 2021. – Т. 25, №. 2. – P. 108-115. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-2-108-115> (In Russ.).

7. Mazurkin P. M., Mohirev A. P., Rukomojnikov K. P. *Rejtingi grupp faktorov vyvozki sortimentov* [Ratings of groups of factors for the removal of logs]. *Resources and Technology*. – 2021. – Т. 18, №. 3. – P. 37-52. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5803> (In Russ.).

8. Mohirev A. P., Rukomojnikov K. P., Mazurkin P. M. *Zakonomernosti rangovyh raspredelenij faktorov vyvozki drevesiny s lesnyh uchastkov* [Patterns of rank distributions of wood removal factors from forest areas]. *Forestry Bulletin*. – 2021. Т. 25. № 4. P. 112-120. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-4-112-120> (In Russ.).

9. Zhang J., Liu J., Liu B., Li M. Fractional Order PID Control Based on Ball Screw Energy Regenerative Active Suspension. *Actuators*, 2022, 11(7), 189. DOI: <https://doi.org/10.3390/act11070189>.
10. Hu G., Wu L., Deng Y., Yu L., Luo B. Damping Performance Analysis of Magnetorheological Damper Based on Multiphysics Coupling. *Actuators*, 2021, 10(8), 176. DOI: <https://doi.org/10.3390/act10080176>.
11. Song H., Dong M., Wang X. Research on Inertial Force Attenuation Structure and Semi-Active Control of Regenerative Suspension. *Applied Sciences*, 2024, 14(6), 2314. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14062314>.
12. Jia Y., Li S., Shi Y. An Analytical and Numerical Study of Magnetic Spring Suspension with Energy Recovery Capabilities. *Energies*, 2018, 11(11), 3126. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113126>.
13. Duong M.-T., Chun Y.-D., Hong D.-K. Design of a High-Performance 16-Slot 8-Pole Electromagnetic Shock Absorber Using a Novel Permanent Magnet Structure. *Energies*, 2018, 11(12), 3352. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11123352>.
14. Bowen L., Vinolas J., Olazagoitia J. L. Design and Potential Power Recovery of Two Types of Energy Harvesting Shock Absorbers. *Energies*. 2019. 12(24). 4710. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12244710>.
15. Lee J., Chun Y., Kim J., Park B. An Energy-Harvesting System Using MPPT at Shock Absorber for Electric Vehicles. *Energies*, 2021, 14(9), 2552. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092552>.
16. Alhumaid S., Hess D., Guldiken R. A Noncontact Magneto-Piezo Harvester-Based Vehicle Regenerative Suspension System: An Experimental Study. *Energies*, 2022, 15(12). 4476. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124476>.
17. Jamolov U., Peccini F., Maizza G. Multiphysics Design of an Automotive Regenerative Eddy Current Damper. *Energies*, 2022, 15(14), 5044. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15145044>.
18. Reyes-Avenidaño J. A., Moreno-Ramírez C., Gijón-Rivera C., Gonzalez-Hernandez H. G., Olazagoitia J. L. Can a Semi-Active Energy Harvesting Shock Absorber Mimic a Given Vehicle Passive Suspension? *Sensors*, 2021, 21(13), 4378. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134378>.
19. Huang J., Wang E., Zhang H. Analysis and Research on the Comprehensive Performance of Vehicle Magnetorheological Regenerative Suspension. *Vehicles*, 2020, 2(4), 576-588. DOI: <https://doi.org/10.3390/vehicles2040033>.
20. Casavola A., Tedesco F., Vaglica P. Optimal Control Strategies for Energy Harvesting by Regenerative Shock Absorbers in Cars. *Vibration*, 2020, 3(2), 99-115. DOI: <https://doi.org/10.3390/vibration3020009>.
21. Zhang R., Wang X., John S. A Comprehensive Review of the Techniques on Regenerative Shock Absorber Systems. *Energies*, 2018, 11(5), 1167. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051167>.
22. Hu X., Sun J., Chen Y., Liu Q., Gu L. Considering Well-to-Wheels Analysis in Control Design: Regenerative Suspension Helps to Reduce Greenhouse Gas Emissions from Battery Electric Vehicles. *Energies*, 2019, 12(13), 2594. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12132594>.
23. Kou F., Du J., Wang Z., Li D., Xu J. Nonlinear Modeling and Coordinate Optimization of a Semi-Active Energy Regenerative Suspension with an Electro-Hydraulic Actuator. *Algorithms*, 2018, 11(2), 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/a11020012>.
24. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Sinicin A. S. *Analiz konstrukcii elektromagnitnih amortizatorov, rekuperiruyuschih energiyu v podveskah avtomobilei* [Analysis of the designs of electromagnetic shock absorbers that recuperate energy in car suspensions]. Problems of operation and prospects for the development of road transport: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference, Voronezh, October 05-06, 2023 / Rep. editor V.O. Nikonov. – Voronezh, 2023. – P. 31-44. DOI: [https://doi.org/10.58168/OPPRTD\\_31-44](https://doi.org/10.58168/OPPRTD_31-44) (In Russ.).
25. Mironov D. V., et. al. *Rekuperativnii amortizator na osnove lineinogo elektrodvigatelya s postoyannimi magnitami* [Regenerative shock absorber based on a linear permanent magnet motor]. Patent RF, no 2799872, 2023.

### 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, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 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, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, 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 кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: [victorvpo@mail.ru](mailto:victorvpo@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, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

### Information about the authors

*Valerii I. Posmetev* – Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: [posmetyev@mail.ru](mailto:posmetyev@mail.ru).

✉ *Vadim O. Nikonov* – Cand. Sci. (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, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: [8888nike8888@mail.ru](mailto:8888nike8888@mail.ru).

*Viktor V. Posmetev* – Cand. Sci. (Physical and Mathematical Sciences), Associate 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, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: [victorvpo@mail.ru](mailto:victorvpo@mail.ru).

*Vladimir A. Zelikov* – Dr. Sci. (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, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: [zelikov-vrn@mail.ru](mailto:zelikov-vrn@mail.ru).

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16>

УДК 630:62-91



## Моделирование работы механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода

Александр Т. Рыбак<sup>1</sup>, 2130373@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9950-3377>

Пётр И. Попиков<sup>2</sup>, popikovpetr@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Денис Ю. Дручинин<sup>2</sup>, druchinin.denis@rambler.ru <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

Константин Г. Хоменко , slash4850@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0005-4732-1535>

Сергей К. Попиков<sup>2</sup>, sergpopikov@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, Ростов-на-Дону, 344003, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация

Многообразие вариантов конструктивного исполнения систем гидравлических приводов технологических машин вызывает необходимость анализа преимуществ и недостатков, существующих и перспективных технических решений. Установлено, что при исследовании и проектировании машин и оборудования находит широкое применение математическое моделирование рабочих режимов их функционирования, что позволяет обосновать и оптимизировать конструктивные и технологические параметры схем рекуперации энергии в гидроприводах манипуляторов, приводных колесах и тягово-цепных устройствах лесовозных автомобилях. Цель работы заключается в снижении энергоёмкости и динамической нагруженности механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза на основе моделирования работы механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода. В качестве объекта исследования выбран механизм поворота колонны серийного лесного манипулятора Атлант С100 на базе автомобиля повышенной проходимости КамАЗ-680247. При модернизации механизма поворота колонны предложено одну пару двоядных гидроцилиндров отключить от насоса и подключить к гидроаккумулятору. При этом гидроаккумулятор не имеет гидравлической связи с насосом для подзарядки, а при полной зарядке от гидроцилиндров рекуперации сообщается через дополнительные обратные клапаны с разгрузочным клапаном и распределителем для перевода насоса в режим холостого хода. В дифференциальном уравнении вращательного движения колонны учтены моменты движущих сил и сил сопротивления. При моделировании рабочих процессов энергосберегающего гидропривода составлены дифференциальные уравнения расходов рабочей жидкости на входе и выходе отдельных участков расчетной гидравлической схемы. Составленная математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений решена при помощи среды моделирования SimInTech. Получены теоретические зависимости давления рабочей жидкости в различных точках гидросистемы при использовании энергосберегающего устройства, на основании которых можно обосновать оптимальные параметры и режимы работы механизма поворота колонны манипуляторного оборудования, используемого в лесном комплексе.

**Ключевые слова:** манипулятор, механизм подъема, энергосберегающий гидропривод, кинематика, автосортиментовоз, расход жидкости, жесткость



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

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

**Конфликт интересов:** авторы данной статьи заявляют об отсутствии личных, коммерческих, идеологических, интеллектуальных конфликтов интересов при подготовке, написании и публикации данной статьи.

**Для цитирования:** Моделирование работы механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода / А. Т. Рыбак, П. И. Попиков, Д. Ю. Дручинин, К. Г. Хоменко, С. К. Попиков // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 280–294. – Библиогр.: с. 291–294 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16>.


*Поступила* 16.04.2024. *Пересмотрена* 24.05.2024. *Принята* 25.05.2024. *Опубликована онлайн* 17.06.2024.


*Article*


## **Modeling of work process of the column rotation mechanism of the auto-sortiment truck manipulator, taking into account the volumetric rigidity of the energy-saving hydraulic drive**

**Alexander T. Rybak**<sup>1</sup>, 2130373@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9950-3377>

**Petr I. Popikov**<sup>2</sup>, popikovpetr@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

**Denis Yu. Druchinin**<sup>2</sup>, druchinin.denis@rambler.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>

**Konstantin G. Khomenko**<sup>2</sup>, lash4850@yandex.ru  <https://orcid.org/0009-0005-4732-1535>

**Sergei K. Popikov**<sup>2</sup>, popikovpetr@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

<sup>1</sup>*Don State Technical University, pl. Gagarina, 1, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

### **Abstract**

The variety of design options for hydraulic drive systems of technological machines makes it necessary to analyze the advantages and limitations of existing and promising technical solutions. It has been established that in the research and design of machines and equipment, mathematical modeling of their operating modes is widely used, which makes it possible to justify and optimize design and technological parameters already at the design stage of promising energy recovery schemes in hydraulic drives of manipulators, drive wheels and traction devices of timber vehicles. The purpose of the work is to reduce the energy intensity and dynamic load of the column rotation mechanism of the auto-sortiment truck manipulator based on modeling the operation of the column rotation mechanism of the auto-sortiment truck manipulator, taking into account the volumetric rigidity of the energy-saving hydraulic drive. The column rotation mechanism of the serial forestry manipulator Atlant S100 based on the KamAZ-680247 off-road vehicle was chosen as the object of study. When upgrading the column rotation mechanism, it was proposed to disconnect one pair of double hydraulic cylinders from the pump and connect it to a hydraulic accumulator. Moreover, the hydraulic accumulator does not have a hydraulic connection with the pump for recharging, and when fully charged, the recovery hydraulic cylinders communicate through additional check valves with the unloading valve and distributor to switch the pump to idle mode. The differential equation for the rotational motion of the column takes into account the moments of driving forces and resistance forces. When modeling the working processes of an energy-saving hydraulic drive, differential equations for the flow of working fluid at the inlet and outlet of individual sections of the design hydraulic circuit were compiled. The compiled mathematical model in the form of a system of differential equations is solved using the SimInTech modeling

environment. Theoretical dependences of the pressure of the working fluid at various points of the hydraulic system using an energy-saving device have been obtained, on the basis of which it is possible to substantiate the optimal parameters and operating modes of the mechanism for turning the column of a manipulator equipment used in the forest complex.

**Keywords:** *manipulator, lifting mechanism, energy-saving hydraulic drive, kinematics, short-cut truck, fluid flow, rigidity*

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

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

**Conflict of interest:** the authors of this article stated that there were no personal, commercial, ideological, intellectual conflicts of interest in the preparation, writing and publication of this article.

**For citation:** Rybak A. T., Popikov P. I., Druchinin D. Yu., Khomenko K. G., Popikov S. K. (2024). Modeling of work process of the column rotation mechanism of the auto-sortiment truck manipulator, taking into account the volumetric rigidity of the energy-saving hydraulic drive. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 280-294 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/16>.

*Received* 16.04.2024. *Revised* 24.05.2024. *Accepted* 25.05.2024. *Published online* 17.06.2024.

### Введение

В настоящее время проблема энергоэффективности технологических машин и оборудования актуальна в различных отраслях производства в нашей стране и за рубежные страны. При исследовании и проектировании машин и оборудования находят широкое применение математическое моделирование рабочих режимов их функционирования, что позволяет обосновать и оптимизировать конструктивные и технологические параметры уже на стадии проектирования.

В работе Авдеевой Е.В. и др. (2020) [1] приведены результаты математического моделирования рабочих режимов гидропривода манипулятора лесопогрузчика. На основании решения неоднородных дифференциальных уравнений движения стрелы и поворотной колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода, а также расходов рабочей жидкости получены расчетные формулы для определения усилий на штоках гидроцилиндров, скоростей и ускорений стрелы и колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода. Установлено, что скорость движения штока гидроцилиндра поворота колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода

изменяется от 0,042 м/с до 0,0691 м/с, а усилия на штоке от 329114 до 562621 Н. (рис. 1).



Рисунок 1. Нагрузки на гидроцилиндры привода колонны

Figure 1. Loads on hydraulic cylinders of the column drive

Источник: Авдеева Е.В., Полетайкин В.Ф. Исследование нагрузок на гидроцилиндры манипулятора // Хвойные бореальной зоны. 2020; 28 (5-6): 305–309. <https://elibrary.ru/vknnjg>.

Source: Avdeeva E.V., Poletaykin V.F. Investigation of loads on hydraulic cylinders of the manipulator // Coniferous boreal zones. 2020; 28 (5-6): 305–309. <https://elibrary.ru/vknnjg>.

В работах Кузнецова В.Н. и Романенко Р.В. (2021), Романенко Р.В. и Сергеева В.В. (2020) [2, 3] проведено исследование энергетических характеристик электромеханической трансмиссии гусеничной

машины. Разработана и решена математическая модель движения машины с электромеханической системой и накопителем энергии. N, кВт. Авторами выявлен тот факт, что на привод поворачивающей гусеницы при скорости 18 м/с затраты мощности равняются 170 кВт, величина рекуперативной мощности – 150 кВт, а в режиме установившегося движения – 5 кВт.

Проведены исследования Савинкина В.В. 2021 Savinkin V.V., Kolisnichenko S.N., Ivanova O.V., Zhumekenova Z.Z., Sandu A.V., Vizureanu P. 2021 Savinkin V.V., Zhumekenova Z.Z., Kolisnichenko S.N., Ivanova O.V., Sandu A.V., Vizureanu P., Savinkin S.V. 2021 [4-6] эффективности электрогидроцилиндра рекуперативного действия в составе нефтедобывающего комплекса, который позволяет запасать энергию опускающего груза и возвращать обратно около 27% на полезную работу.

В работах авторов Лагеревы И.А. Лагеревы А.В. 2019 Лагеревы А.В. 2019 [7;8] предложена методика моделирования рабочих процессов кранов-манипуляторов при совмещении движений стрелы и рукояти. Установлено, что время подъема стрелы составляет 6,6 секунд, а рукояти 3,4 секунд, при этом наблюдается ярко выраженный колебательный процесс давления рабочей жидкости на выходе из гидронасоса из-за частого срабатывания предохранительного клапана, среднее давление стабилизируется на уровне 12,5 МПа.

В работах Посметьева В.И. 2022, Posmetev V.I. 2019, Посметьева В.И. 2022, Посметьева В.И., Никонова В.О. 2022 [9-11, 12] дан анализ конструкций гидроприводов механизмов поворота колонны манипуляторов, указаны преимущества и недостатки существующих и перспективных технических решений. Математическое описание рабочего процесса гидравлического привода позволило авторам выполнить оптимизацию характеристик для целого ряда перспективных схем повторного использования энергии в гидроприводах движителей, манипуляторных установок и тягово-сцепных устройств лесовозных автомобилей. Разработаны алгоритмы многоуровневой оптимизации с использованием математического аппарата радиальных нейронных сетей. При проведении компьютерного моделирования установлен оптимальный диаметр гидроцилиндра рекуперации сцепного устройства

равный 100 ... 120 мм, а запасаемая мощность 6,4 ... 6,5 кВт.

В статье Ворожцова О.В. [13] предложена методика выбора и расчета полезного объема и величины давления предварительной зарядки гидроаккумулятора для гидроприводов рекуперации энергии на транспортных машинах.

Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. в работах [14, 15] привели результаты исследования динамики электрогидростатического привода манипуляторной установки большой грузоподъемности. Сопоставление эффективности его работы со штатным гидроприводом клапанного управления показало, что предлагаемый электрогидростатический привод обеспечивает повышение эффективности за счет повторного использования энергии.

В работах Вялова С.А., Рыбак А.Т., Цыбрий И.К., Пелипенко А.Ю. [16, 17] рассмотрены актуальные вопросы регулирования скорости возвратно-поступательного перемещения штока гидроцилиндра пресса, оборудованным насосно-аккумуляторным устройством для повторного использования энергии. Математическое описание рабочих процессов пресса проведено с учетом объемной жесткости элементов гидравлики. Для оценки ресурса надежности плунжерных гидроцилиндров с рекуперацией энергии в лабораторных условиях авторами предложена новая конструкция испытательного стенда. Вычисление требуемых параметров на основе математического моделирования в среде SimInTech позволило выявить степень влияния параметров гидропривода на эффективность процесса работы системы.

В статье Попикова П.И., Конюхова А.В. и др. [18] предлагается конструкция стенда для исследования динамики гидропривода лесных манипуляторов с рекуперацией энергии. Стенд оборудован современным тензодатчиками давления рабочей жидкости ПД-100 и тензометрической лабораторией ZETLAB ZET 058

Федченко В.Б., Хакимовым Э.Ф. [19] обоснована компоновочная схема форвардера с колесной формулой бхб, причем три равноудаленные оси колес не связаны друг с другом и могут самостоятельно осуществлять повороты по пересеченной местности. Проведено исследование привода колес от гидромоторов, которые обеспечивают рекуперацию энергии при поворотах.

В работе Четвериковой И.В., Зимарина С.В. и Бурдыкина А.В. [20] проведены теоретические и экспериментальные исследования динамики энерго-сберегающего гидропривода бесчокерного трелевочного захвата при трелевке древесины, энергия рекуперации составила 1,7 ... 2,1 кВт.

В работе Власова и др. 2022 [21] представлены результаты исследований динамики и устойчивости следящего гидропривода манипулятора лесной машины. на основе линеаризованных моделей.

В работе Глушкова С.П., Попикова П.И., Рыбак А.Т. и др. [22] дается обоснование гидропривода механизма подъема стрелы с рекуперацией энергии в переходных режимах.

Математическая модель рабочего процесса гидропривода решена применением метода конечных разностей, при этом система сводится к рекуррентным соотношениям второго порядка. Функции давления рабочей жидкости, угла поворота стрелы, угловых скорости и ускорения определяются в узлах разбиения отрезка по времени. Аналитические вычисления проведены в программном продукте MathCad. Экспериментальные исследования на лабораторном стенде подтвердили адекватность математической модели рабочих процессов гидроманипулятора.

В работе Соколова А.П. 2023 [23] описывается новая имитационная модель процессов заготовки древесины, которая решена в среде пакета программ AnyLogic. С помощью данной модели можно описать лесосеки любой конфигурации, изменять характеристики древостоя. При моделировании работы лесосечных машин можно менять их состав и количество, с учетом ограничений по безопасности и пространственного характера.

Цель работы заключается в снижении энергоемкости и динамической нагруженности механизма поворота колонны манипулятора автолесовоза на основе разработанной математической модели рабочих процессов и обоснования параметров энергосберегающего гидропривода.

### **Материалы и методы**

#### *Объект и предмет исследования*

В качестве объекта исследования выбран механизм поворота колонны серийного лесного мани-

пулятора Атлант С100 на базе автомобиля повышенной проходимости КамАЗ- 680247.

Предметом исследования являются математическая модель процесса поворота колонны с учетом объемной жесткости элементов энергосберегающего гидропривода и теоретические зависимости давления рабочей жидкости в гидросистеме.

Предлагается новая конструкция энергосберегающего гидропривода механизма поворота колонны манипулятора автолесовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода (рис. 2) отличающаяся тем, что он снабжен двумя гидроцилиндрами рекуперации 10 и 11, подключенных к гидроаккумулятору 18.

Рекуперация энергии происходит при тормозных режимах поворотной колонны 1, установленной на раме 2. В момент остановки поворота вертикального основания в ту или иную сторону гидролинии 7 и 8 становятся запертыми и давление в полостях гидроцилиндров 5 или 6 резко повышается до предельных значений за счет того, что колонна из-за инерционных сил продолжает поворот. В гидроцилиндрах возвращения энергии 10 или 11 также будет наблюдаться избыточное давление и рабочая жидкость через обратные клапаны 15 или 16 поступает в гидроаккумулятор 18, подзаряжая его, кроме этого происходит демпфирование забросов давления в силовых гидроцилиндрах и их гидролиниях. Поэтому кроме снижения энергозатрат энергосберегающий гидропривод снижает динамические нагрузки и повышает надежность механизма поворота.

При полностью заряженном гидроаккумуляторе 18 рабочая жидкость поступает через обратный клапан 31 в разгрузочный 29, который превращает предохранительный 30 в переливной и насос 33 будет работать в холостом режиме, при этом экономится энергия на привод насоса.

В новой конструкции механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза предусмотрена система подпитки гидроцилиндров рекуперации. При повороте вертикального основания в ту или иную сторону в полостях энергосберегающих цилиндров 10 или 11 создается разрежение и рабочая жидкость из гидробака 22 по линии 21 поступает на вход цилиндров через обратные клапаны 19 или 20.

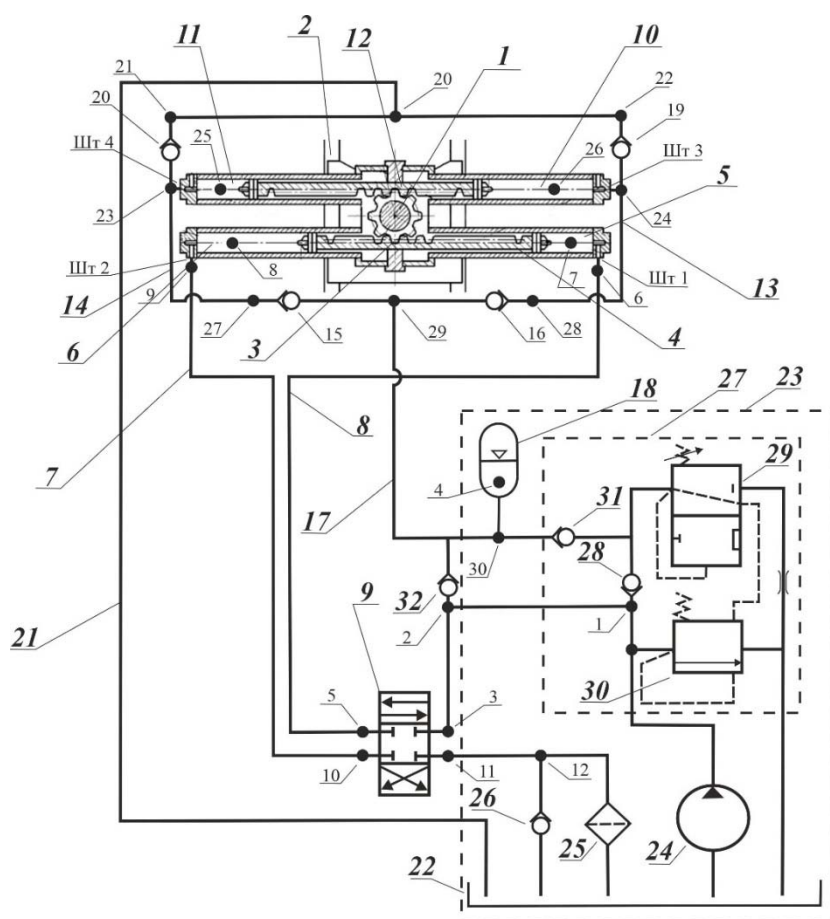


Рисунок 2. Гидрокинематическая схема энергосберегающего гидропривода механизма поворота колонны манипулятора автосортировочного с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода

Figure 2. Design diagram of the hydraulic manipulator column rotation mechanism

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

*Теоретические предпосылки*

При математическом моделировании гидравлической схемы механизма поворота колонны гидроманипулятора лесотранспортной машины, дифференциальные уравнения расходов рабочей жидкости составляются для отдельных участков гидравлической системы.

Для первого участка гидравлической системы насос 24 – точка 1 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (1). Рабочая жидкость подается по линии с приведенным коэффициентом объемной жесткости  $C_1$  от насоса 24 с действительной подачей  $Q_H$  к точке 1, а часть жидкости через обратный клапан 28 с расходом  $Q_{1-ок28}$  заполняет замкнутый контур между обратным клапаном 31 и разгрузочным клапаном 29.

Для второго участка 1-2 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (2). От точки 1 гидросхемы жидкость поступает через гидролинию 1-2 с приведенным коэффициентом объемной жесткости  $C_2$ , с расходом  $Q_{1-2}$  к точке 2.

Для третьего участка 2-3 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (3). От точки 2 гидросхемы жидкость поступает через гидролинию 2-3 с приведенным коэффициентом объемной жесткости  $C_3$  с расходом  $Q_{2-3}$  на вход распределителя 9 к точке 3.

Для четвертого участка 3-5 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (4). На участке 3-5 жидкость проходит через распределитель 9 с расходом  $Q_{3-5}$  и приведенным коэффициентом объемной жесткости  $C_4$ .

Для пятого участка 5-6 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (5). На участке 5-6 жидкость проходит от распределителя **9** через гидролинию 5-6 с приведенным коэффициентом объемной жесткости  $C_5$  с расходом  $Q_{5-6}$  к входному штуцеру силового гидроцилиндра **5**.

Для шестого участка 6-7 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (6). На участке 6-7 жидкость поступает через штуцер Шт1 с приведенным коэффициентом объемной жесткости  $C_6$  с расходом рабочей жидкости через входной штуцер  $Q_{шт1}$  в точку 7 штоковой полости гидроцилиндра **5**.

Для седьмого участка 7-8 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (6). На седьмом участке 7-8 расход рабочей жидкости в цилиндре **5** представлен разностью между расходом через входной штуцер и расходом цилиндра **5** при перемещении поршня с площадью поперечного сечения  $f_{пл1}$  с определенной скоростью  $v_{п1}$ . Приведенный коэффициент объемной жесткости  $C_{ц}$  учитывает жесткость стенок цилиндра и рабочей жидкости.

Для восьмого участка 8-9 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (8). На восьмом участке 8-9 расход рабочей жидкости представлен разностью между расходом гидроцилиндра **5** и расходом через выходной штуцер  $Q_{шт2}$  цилиндра **6**. Приведенный коэффициент объемной жесткости  $C_{ц2}$  учитывает жесткость стенок цилиндра и рабочей жидкости.

Для девятого участка 9-10 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (9). На участке 9-10 гидросхемы рабочая жидкость через выходной штуцер с расходом через выходной штуцер  $Q_{шт2}$  из гидроцилиндра **6** поступает по линии 9-10 в распределитель к точке 10 с расходом жидкости  $Q_{9-10}$ . Приведенный коэффициент объемной жесткости  $C_9$  учитывает жесткость стенок трубопровода и рабочей жидкости.

Для десятого участка 10-11 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (10). От точки 10 гидросхемы жидкость поступает через распределитель **9** к точке 11 с приведенным коэффициентом объемной жесткости  $C_{10}$  с расходом  $Q_{10-11}$ .

Для одиннадцатого участка 11-12 расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (11). От точки 11 гидросхемы жидкость поступает через гидролинию 11-12 с приведенным коэффициентом объемной жесткости  $C_{11}$ , с расходом  $Q_{11-12}$  к точке 12. Далее рабочая жидкость проходя точку 12 гидросхемы через фильтр **25** или если фильтр засорен через обратный клапан **26** сбрасывается в гидробак **22**.

Для двенадцатого участка расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (12). При моделировании вращательного движения вертикального основания вправо в режиме торможения расход рабочей жидкости в цилиндре **10** с выходом жидкости через штуцер Шт3, будет имитировать остановку вертикального основания манипулятора автосортиментовоза. Расход рабочей жидкости в цилиндре **10** представлен разностью между расходом цилиндра при перемещении поршня с площадью  $f_{пл2}$  с определенной скоростью  $v_{п2}$  и расходом через штуцер **4**.

Для тринадцатого участка расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (13). На участке 24-28 гидросхемы, жидкость подается через обратный клапан **16** с расходом  $Q_{27-ок16}$ .

Для четырнадцатого участка расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (14). На участке 29-30 гидросхемы, жидкость от обратного клапана **16** подается на вход пневмогидроаккумулятора **30** с расходом жидкости  $Q_{29-30}$ .

Для пятнадцатого участка расход рабочей жидкости описывается дифференциальным уравнением (15). В точке 30 гидросхемы, рабочая жидкость подается по линии 11 в гидроаккумулятор **4** с расходом рабочей жидкости на входе гидроаккумулятора при его зарядке  $Q_{AK}$  и приведенным коэффициентом объемной жесткости рабочей камеры аккумулятора  $C_{AK}$ .

Дифференциальные уравнения расходов рабочей жидкости с учетом объемной жесткости элементов энергосберегающего гидропривода согласно расчетной схемы (рис. 2) будут иметь вид:

$$dp_1 = C_1 (Q_n - Q_{n-1} - Q_{1-ок28}) dt; \quad (1),$$

$$dp_2 = C_2 (Q_{n-1} - Q_{1-2}) dt; \quad (2),$$

$$dp_3 = C_3 (Q_{1-2} - Q_{2-3}) dt; \quad (3),$$

$$dp_4 = C_4 (Q_{2-3} - Q_{3-5}) dt; \quad (4),$$

$$dp_5 = C_5 (Q_{3-5} - Q_{5-6}) dt; \quad (5),$$

$$dp_6 = C_6 (Q_{5-6} - Q_{шт1}) dt; \quad (6),$$

$$dp_7 = C_{ц} (Q_{шт1} - f_{пл1} v_{пл1}) dt; \quad (7),$$

$$dp_8 = C_{ц} (f_{пл1} v_{пл1} - Q_{шт2}) dt; \quad (8),$$

$$dp_9 = C_9 (Q_{шт2} - Q_{9-10}) dt; \quad (9),$$

$$dp_{10} = C_{10} (Q_{9-10} - Q_{10-11}) dt; \quad (10),$$

$$dp_{11} = C_{11} (Q_{10-11} - Q_{11-12}) dt; \quad (11),$$

$$dp_{12} = C_{ц} (f_{пл2} v_{пл2} - Q_{шт3}) dt; \quad (12),$$

$$dp_{13} = C_{24} (Q_{шт3} - Q_{24-28} - Q_{ок16}) dt; \quad (13),$$

$$dp_{14} = C_{29} (Q_{ок16} - Q_{29-30}) dt; \quad (14),$$

$$dp_{15} = C_{AK1} Q_{AK} dt; \quad (15),$$

Для моделирования работы механизма поворота колонны манипулятора автосортировочного с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода разработана математическая модель, включающая дифференциальные уравнения вращения колонны механизма и расходов рабочей жидкости на отдельных участках гидравлической системы с учетом объемной жесткости элементов энергосберегающего гидропривода.

Механическая подсистема, осуществляющая поворот основания манипулятора, была проанализирована с использованием расчетных изображений (рис. 3). В итоге было составлено дифференциальное уравнение процесса поворота колонны:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = M_{ГЦ} - M_G - M_{ТР} - k_{ТК} \frac{d\varphi}{dt} + M_y + M_B \quad (16),$$

где  $J$  – момент инерции вертикального основания, кг м<sup>2</sup>,  $M_{ГЦ}$  – движущий момент, сообщаемый поворотному основанию гидроцилиндром Нм;  $M_G$  – момент со стороны приводимого в движение груза Нм;  $M_{ТР}$  – момент сил трения в подшипниках вертикального основания, Нм;  $k_{ТК}$  – приведенный коэффициент вязкого трения в силовых цилиндрах поворота и цилиндрах рекуперации;  $M_y$  – момент сил от уклона местности, Нм;  $M_B$  – момент сил сопротивления волочения пачки сортиментов, Нм;  $t$  – время, с;

При торможении поворота вертикального основания знаки в дифференциальном уравнении (3) меняются на обратные и добавляется момент  $M_p$ , создаваемый гидроцилиндром рекуперации:

$$-J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = -M_{ГЦ} + M_G + M_{ТР} + k_T \frac{d\varphi}{dt} - M_y - M_B + M_p \quad (17).$$

При повороте вертикального основания движущий момент, создаваемый силовым гидроцилиндром механизма поворота колонны, определяется как

$$M_{ГЦ} = \frac{\pi d_c^2 du}{8} p \quad (18)$$

где  $d_c$  – внутренний диаметр силового гидроцилиндра, м;  $du$  – диаметр шестерни поворота вертикального основания, м;  $p$  – текущее давление в гидроприводе, Па.

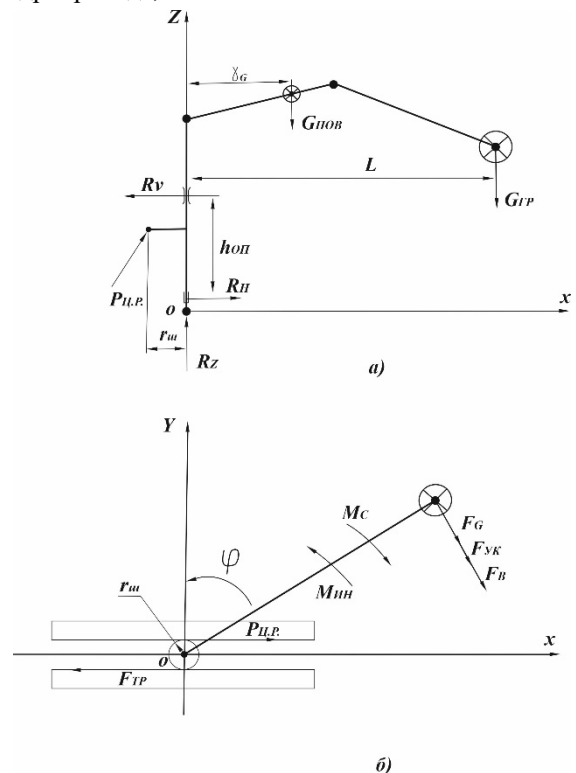


Рисунок 3. Кинематическая схема механизма поворота колонны гидроманипулятора: а) вид сбоку; б) вид сверху  
Figure 3 Kinematic diagram of the rotation mechanism of the hydraulic manipulator column: a) side view; b) top view.

Источник: собственная схема авторов  
Source: author's composition

Момент от силы инерции со стороны приводимого в движение груза

$$M_G = \frac{G_{\text{сп}} * d^2 \phi}{g dt^2} * L \quad (19),$$

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  
 $L$  - вылет манипуляторной установки, м.

Момент сопротивления повороту равен сумме моментов сил трения в опорах  $M_{\text{тр}}$ , сил волочения бревен  $M_B$  при подтаскивании, сил преодоления уклона погрузочной площадки  $M_{\text{ук}}$ :

$$M_C = \sum M_{\text{тр}} + M_B + M_{\text{ук}} \quad (20),$$

Момент сил трения в опорах колонны определяется из выражения

$$\sum M_{\text{тр}} = \frac{R_n f_1 d_1}{2} + R_n f_2 d_2 + \frac{R_v f_3 d_3}{2} \quad (21),$$

где  $d_1, d_2, d_3$  — диаметры верхней и нижней опор и подпятника;  $f_1, f_2, f_3$  — коэффициенты трения в верхней и нижней опорах;  $f = 0,015 \dots 0,020$  для подшипников качения  $R_n, R_v$  — горизонтальная и вертикальная реакции, воспринимаемые подпятником.  $f$  - приведенный коэффициент трения скольжения в подшипнике;  $R_n$  - горизонтальная реакция в нижней опоре колонны, Н;  $d_2$  — диаметр нижнего подшипника, м;  $d_3$  — диаметр верхнего подшипника, м;  $d_{\text{цр}}$  — диаметр гидроцилиндра рекуперации, м;  $R_v$  -- горизонтальная реакция в верхней опоре, колонны Н мм:

$$R_n = R_v G_{\text{ГП}} L / h_{\text{оп}} \quad (22),$$

где  $h_{\text{оп}}$  — расстояние между опорами колонны, м;

$M_{\text{ук}}$  - момент от сил сопротивления от уклона, Н мм:

$$M_{\text{ук}} = (G_{\text{пов}} \gamma_G + G_{\text{ГП}} L) \sin \alpha \quad (23),$$

$G_{\text{пов}}$  — сила тяжести поворотной части манипулятора, кг;

$\gamma_G$  - расстояние от оси вращения до центра тяжести поворотной части манипулятора, м;

$M_B$  - момент от сил сопротивления волочения пачки сортиментов, Н;

$$M_B = G_{\text{ГП}} L f_4 \quad (24),$$

где  $f_4$  - коэффициент сопротивления волочению бревен в начале подъема и укладки на грузовую платформу автомобиля.

Момент, от силы на штоке гидроцилиндра рекуперации определяется из выражения

$$M_P = \frac{\pi d^2_{\text{цр}}}{4} p_A r_{\text{ш}} \quad (25),$$

$p_A$  — текущее значение давления в гидроаккумуляторе, Па;

Подставив значения моментов из формул (4-10) в дифференциальное уравнение вращения вертикального основания при разгоне (2), получим:

$$J \frac{d^2 \phi}{dt^2} = \frac{\pi d_c^2 du}{8} p - \frac{G_{\text{сп}} * d^2 \phi}{g dt^2} * L - R_n f_2 d_2 + \frac{R_v f_3 d_3}{2} - k_{\text{ГК}} \frac{d\phi}{dt} + (G_{\text{пов}} \gamma_G + G_{\text{ГП}} L) \sin \alpha + G_{\text{зп}} L f_4 \quad (26),$$

Подставив значения моментов из формул (4-11) в дифференциальное уравнение поворота колонны при торможении (3), получим выражение

$$J \frac{d^2 \phi}{dt^2} = - \frac{\pi d_c^2 du}{8} p + \frac{G_{\text{сп}} * d^2 \phi}{g dt^2} * L + R_n f_2 d_2 - \frac{R_v f_3 d_3}{2} + k_{\text{ГК}} \frac{d\phi}{dt} - (G_{\text{пов}} \gamma_G + G_{\text{ГП}} L) \sin \alpha - G_{\text{ГП}} L f_4 + \frac{\pi d^2_{\text{цр}}}{4} p_A r_{\text{ш}} \quad (27)$$

Для удобства расчетов на ЭВМ с использованием программного комплекса SimInTech производим переход от вращательного движения колонны к поступательному движению поршня силового гидроцилиндра механизма поворота, используя следующие соотношения:

$$V_{\text{п}} = \omega r_{\text{ш}},$$

где  $V_{\text{п}}$  -поступательная скорость поршня силового гидроцилиндра механизма поворота, м/с;

$\omega$ -угловая скорость поворота колонны,  $\text{с}^{-1}$ ;

$r_{\text{ш}}$  — радиус шестерни поворотной колонны, м.

Тогда ускорение поступательного движения поршня силового гидроцилиндра механизма поворота определим из выражения



$$\frac{dV_{II}}{dt} = \frac{d\omega}{dt} r_{III} = \frac{d^2\phi}{dt^2} r_{III} \quad (28),$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega = V_{II} / r_{III} \quad (29),$$

Полученные формулы подставим в уравнение разгона при повороте колонны:

$$\frac{dV_{II}}{dt} = \frac{1}{J_{II} r_{III}} \left[ \frac{\pi d_c^2 du}{8} p - \frac{G_{TP}}{g} * \frac{d^2\phi}{dt^2} * L - R_n f_2 d_2 + \frac{R_v f_3 d_3}{2} - k_{TK} \frac{d\phi}{dt} + (G_{нов} \gamma_G + G_{TP} L) \sin \alpha + G_{TP} L \right] \quad (30),$$

Уравнение движения поршня гидроцилиндра при торможении колонны будет иметь вид:

$$-\frac{\pi d_c^2 du}{8} p + \frac{G_{TP}}{g} * \frac{d^2\phi}{dt^2} * L + R_n f_2 d_2 - \frac{R_v f_3 d_3}{2} + k_{TK} \frac{d\phi}{dt} - (G_{нов} \gamma_G + G_{TP} L) \sin \alpha - G_{TP} L f_4 + \frac{\pi d_{II}^2}{4} p_{II} r_{III} \quad (31),$$

*Анализ данных*

Реализация составленной модели энергосберегающих процессов гидропривода механизма поворота вертикального основания на основе их математического описания выполняется на основе алгоритма решения дифференциальных уравнений в САПР для логико-динамических систем SimInTech. Значения приведенных жесткостей элементов гидропривода и расходов рабочей жидкости для отдельных участков определялись по расчетным формулам и справочным таблицам.

Необходимо решить на ЭВМ задачи для следующих режимов работы энергосберегающего гидропривода механизма поворота колонны манипулятора автосортиментовоза с учетом объемной жесткости энергосберегающего гидропривода:

- 1) включение и разгон колонны без устройства накопления гидравлической энергии с получением осциллограммы давления рабочей жидкости в различных точках гидросистемы;
- 2) включение и разгон колонны с подключением устройства накопления гидравлической энергии с давлением зарядки 5 МПа с получением осциллограмм давления рабочей жидкости;
- 3) торможение колонны погрузочной установки без подключения устройства накопления гидравлической энергии и с подключением устройства накопления гидравлической энергии;

4) включение и разгон колонны от заряженного устройства накопления гидравлической энергии.

5) получить на лабораторном стенде экспериментальные осциллограммы и проверить их сходимость с теоретическими.

При решении задачи на ЭВМ предусматривается пошаговое вычисление переменных числовых значений давления рабочей жидкости линейных скоростей движений. Вычисление на каждом участке гидравлической схемы переменных значений усилий на подвижных элементах передачи усилия от поршня гидроцилиндров поворота вертикального основания манипулятора.

Анализ полученных результатов. Обоснование основных параметров конструкции механизма поворота колонны манипулятора с установлением оптимальных кинематических характеристик.

В качестве примера на рис. 4 приведены теоретические зависимости давления рабочей жидкости в различных точках гидросистемы энергосберегающего гидропривода механизма поворота колонны погрузочной установки в режиме торможения, а изменение во времени параметров движения поршня гидроцилиндра на рис. 5.

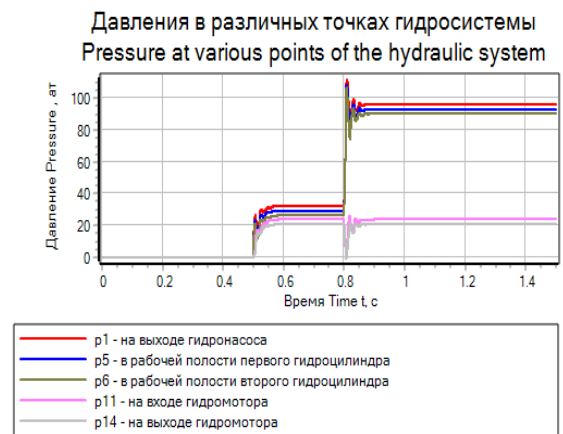


Рисунок 4. Теоретические зависимости давления рабочей жидкости в различных точках гидросистемы

Figure 4. Theoretical dependences of the working fluid pressure at various points of the hydraulic system

Источник: собственная композиция авторов  
Source: author's composition

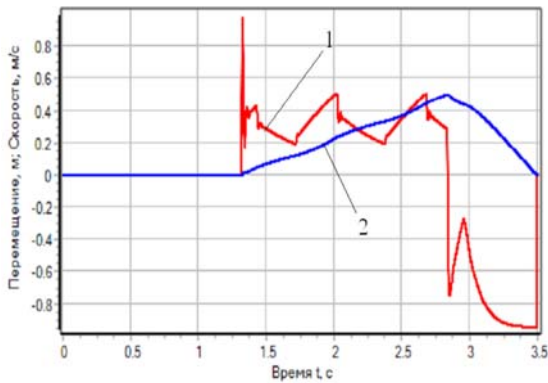


Рисунок 5. Осциллограмма изменения во времени скорости (кривая 1) и перемещения (кривая 2) поршня гидравлического цилиндра вертикального основания погрузочной установки

Figure 5. An oscillogram of the time variation of the velocity (curve 1) and displacement (curve 2) of the hydraulic cylinder piston of the vertical base of the loading plant

Источник: собственные данные авторов  
Source: author's composition

### Обсуждение

Анализ графиков осциллограмм давления рабочей жидкости показал, что в момент торможения колонны давление в гидроцилиндре рекуперации достигает значения 10,5 МПа, а на входе в гидроаккумулятор около 10 МПа, что свидетельствует об эффективности энергосберегающего гидропривода.

Изменение во времени скорости движения поршня гидравлического цилиндра возвращения энергии также находятся в допустимых пределах и соотносятся с результатами работ других исследователей [16-17]. Следующим этапом исследований является проведение экспериментальных исследований на лабораторном стенде с энергосберегающим гидроприводом для подтверждения адекватности математической модели.

### Заключение

На основе анализа конструкций гидроприводов технологических машин выявлены недостатки существующих и перспективных технических решений. Установлено, что при исследовании и проектировании машин и оборудования находит широкое применение математическое моделирование рабочих режимов их функционирования, что позволяет

обосновать и оптимизировать конструктивные и технологические параметры уже на стадии проектирования. Предложена новая конструктивно-технологическая схема механизма поворота колонны манипулятора, в которой гидроаккумулятор не имеет гидравлической связи с насосом для подзарядки, а при полной зарядке от гидроцилиндров рекуперации сообщается через дополнительные обратные клапаны с разгрузочным клапаном и распределителем для перевода насоса в режим холостого хода. При моделировании энергосберегающих процессов работы гидропривода составлены дифференциальные уравнения расходов рабочей жидкости на входе и выходе отдельных участков расчетной гидравлической схемы. Для решения системы дифференциальных уравнений, входящих в состав математической модели, использован функционал программного комплекса SimInTech, имеющего блок решения дифференциальных уравнений. Получены теоретические зависимости давления рабочей жидкости, которое в гидроцилиндре рекуперации достигает значения 10,5 МПа, а на входе в гидроаккумулятор около 10 МПа, а также скорости и перемещения поршня гидроцилиндра энергосберегающего устройства, на основании которых можно обосновать оптимальные параметры и режимы работы механизма поворота вертикального основания лесного манипулятора.

## Список литературы

1. Авдеева Е. В., Полетайкин В. Ф. Исследование нагрузок на гидроцилиндры манипулятора // Хвойные бореальной зоны. 2020; 28 (5-6): 305–309. Режим доступа: <https://elibrary.ru/vkknjg>.
2. Кузнецова В. Н., Романенко Р. В. Исследование энергетических характеристик электромеханической трансмиссии гусеничной машины // Вестник СибАДИ. 2021; 18 (1): 12–29. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29>.
3. Романенко Р. В., Сергеев В. В. Моделирование криволинейного движения роботизированной военной гусеничной машины с электромеханической трансмиссией // Робототехника и техническая кибернетика. 2020; 8 (1): 34–40. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45645617&ysclid=lur32uqew8754088880>.
4. Савинкин В. В. Исследование эффективности перераспределения мощности силового привода нефтедобывающего комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021; Т. 332. № 2. 229–244. Режим доступа: [http://lestehjournal.ru/sites/default/files/journal\\_pdf/131-142.pdf](http://lestehjournal.ru/sites/default/files/journal_pdf/131-142.pdf).
5. Savinkin V. V., Kolisnichenko S. N., Ivanova O. V., Zhumeckenova Z. Z., Sandu A. V., Vizureanu P. (2021) Investigation Of The Strength Parameters Of Drilling Pumps During The Formation Of Contact Stresses In Gears Applied Sciences (Switzerland). Т. 11. № 15. DOI: DOI: 10.3390/app13053153.
6. Savinkin V. V., Zhumeckenova Z. Z., Kolisnichenko S. N., Ivanova O. V., Sandu A. V., Vizureanu P., Savinkin S. V. Coatings.Study Of Wear And Redistribution Dynamic Forces Of Wheel Pairs Restored By A Wear-Resistant Coating 15CR17NI12V3F 2021. Т. 11. № 12. DOI: 10.3390/coatings11121441.
7. Лагереv И. А. Моделирование рабочих процессов в гидроприводе кранов-манипуляторов / И. А. Лагереv, А. В. Лагереv // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники. материалы всероссийской научно-практической конференции. 2019. с. 74-77. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qwxevm&ysclid=lur3ln1yux185211858>.
8. Лагереv А. В. Моделирование рабочих процессов в дроссельно-регулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при совместном движении звеньев / А. В. Лагереv, И. А. Лагереv // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 1. С. 59-82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37289352&ysclid=lur3nj5m7g876441504>.
9. Посметьев В. И., Никонов В. О. О влиянии традиционных конструкций гидроманипуляторов на эффективность лесовозного автомобильного транспорта // Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий и научно-технических решений: материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2022: 24-31. DOI: [http://doi.org/10.58168/PRTOW2022\\_24-31](http://doi.org/10.58168/PRTOW2022_24-31).
10. Posmetev, V. I. Imitating modeling results of a recuperative hydraulic subsystem of the timber truck manipulator / V. I. Posmetev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetev // IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science. 2019; 39: 2012038. DOI: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012038>.
11. Посметьев В. И., Никонов В. О., Мануковский А. Ю., Посметьев В. В. Компьютерное моделирование работы рекуперативного поворотного коникового устройства лесовозного тягача с прицепом-ропуском // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022 № 5. С. 85–99. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>.
12. Посметьев В. И., Зеликов В. А., Никонов В. О., Посметьев В. В., Чуйков А. С., Авдюхин А. В. Влияние режимов движения лесовозного автопоезда при вывозке лесоматериалов на эффективность рекуперации энергии в пневмогидравлическом седельно-сцепном устройстве // Лесотехнический журнал. 2022; 12 (4): 114–129. URL: <https://elibrary.ru/heyhbu>.
13. Ворожцов О. В. Гидропривод рекуперации энергии транспортного средства // Математическое моделирование систем и процессов : материалы Международной научно-практической конференции. Псковский государственный университет. – Псков, 2022: 57-62. URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/621413357/?ysclid=lur3sq0jtw809847007>.
14. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M.R. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators // Energies. 2021; 14 (20): 6566. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206566>.

15. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load // *Mechatronics*. 2021; 77: 102599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102599>.
16. Вялов С. А., Рыбак А. Т., Цыбрий И. К., Пелипенко А. Ю. Трехскоростной гидромеханический привод возвратно-поступательного движения с рекуперацией энергии // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2021; 9: 397-401. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zmqevl&ysclid=lur3um7vby107136240>.
17. Pelipenko A., Rybak A., Sarkisian D., Saakian S., Zhyravlyova A. Stand for Life Tests of Plunger Hydraulic Cylinders // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 246: 198–206. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3\_22.
18. Попиков П. И., Конюхов А. В., Попиков С. К., Попикова А. В. Стенд для испытаний грузоподъемных механизмов лесных манипуляторов с рекуперацией энергии // *Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научнопрактической конференции, Воронеж, 06–07 июня 2022 года. Том Часть II. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – С. 105-110. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49868071>.*
19. Федченко В.Б. Хакимов Э.Ф. Анализ компоновки перспективного Гибридного форвардера с мотор-колесами // *WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS : Матер. XLV Международной научно-практической конференции. Пенза, 2020. С. 42-46. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43847657&ysclid=lur443w3fi231074063>.*
20. Четверикова И. В., Зимарин С. В., Бурдыкин А. В. К вопросу совершенствования гидропривода бесчокерного трелевочного захвата // *Повышение эффективности лесного комплекса : матер. седьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием. – Петрозаводск, 2021. – С. 197-199. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/rouesk>.*
21. Власов Е.Н., Сергеевичев А.В., Добрынин Ю.А., Сергеевичев В.В. Анализ работы гидравлического манипулятора лесной машины с цикловой системой управления. // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2022. С. 99-112. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.99-112>.
22. Глушков С., Рыбак А. Т., Попиков П. И., Усков В. И., Богданов Д. С., Конюхов А. В. Моделирование рабочих процессов энергосберегающего гидропривода механизма подъема лесного манипулятора// *Лесотехнический журнал*. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 88–99. – Библиогр.: с. 96–98 (13 назв.). – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8.
23. Соколов А. П. Имитационное моделирование процессов заготовки древесины // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2023. Вып. 245. С. 244–260. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.244-260.

### References

1. Avdeeva E. V., Poletaykin V. F. Investigation of loads on hydraulic cylinders of the manipulator // *Coniferous boreal zones*. 2020; 28 (5-6): 305–309. Access mode: <https://elibrary.ru/vknnjg>.
2. Kuznetsova V. N., Romanenko R. V. Investigation of the energy characteristics of the electromechanical transmission of a tracked vehicle // *SibADI Bulletin*. 2021; 18 (1): 12-29. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-12-29>.
3. Romanenko R. V., Sergeev V. V. Modeling of curvilinear motion of a robotic military tracked vehicle with an electromechanical transmission // *Robotics and technical cybernetics*. 2020; 8 (1): 34–40. Working hours: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45645617&ysclid=lur32uqew8754088880>.
4. Savinkin V. V. Investigation of the efficiency of power redistribution of the power drive of the oil production complex // *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2021; vol. 332. No. 2. 229-244. Working hours: [http://lestehjournal.ru/sites/default/files/journal\\_pdf/131-142.pdf](http://lestehjournal.ru/sites/default/files/journal_pdf/131-142.pdf).
5. Savinkin.V. V., Kolisnichenko S. N., Ivanova O. V., Zhumekenova Z. Z., Sandu A. V., Vizureanu P. (2021) Investigation Of The Strength Parameters Of Drilling Pumps During The Formation Of Contact Stresses In Gears Of Applied Sciences (Switzerland). Vol. 11. No. 15. Doi-Doi: 10.3390/app13053153.
6. Savinkin V. V., Zhumekenova Z. Z., Kolisnichenko S. N., Ivanova O. V., Sandu A. V., Vizureanu P., Savinkin S. V. Coatings.Study Of Wear And Redistribution Dynamic Forces Of Wheel Pairs Restored By A Wear-Resistant Coating 15CR17Ni12V3F 2021. Vol. 11. No. 12. DOI: 10.3390/coatings11121441.

7. Lagerev I. A., Lagerev A. V. Modeling of work processes in hydraulic drive of cranes. Innovative development of lifting and transport equipment. materials of the All-Russian scientific and practical conference. 2019. pp. 74-77. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qwxevm&ysclid=lur3ln1yyx185211858>.
8. Lagerev A. V., Lagerev I. A. Modeling of work processes in a throttle-controlled hydraulic drive of manipulation systems of mobile machines with joint movement of links. Scientific and technical bulletin of the Bryansk State University. 2019; 1: 59-82. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37289352&ysclid=lur3nj5m7g876441504>.
9. Posmetyev V. I., Nikonov V. O. On the influence of traditional hydraulic manipulator designs on the efficiency of logging motor transport // Problems of operation of motor transport and ways to solve them based on promising technologies and scientific and technical solutions: materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference. 2022: 24-31. DOI: [http://doi.org/10.58168/PRTOW2022\\_24-31](http://doi.org/10.58168/PRTOW2022_24-31).
10. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. Imitating modeling results of a recuperative hydraulic subsystem of the timber truck manipulator. IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science. 2019; 39: 2012038. DOI: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012038>.
11. Posmetyev V. I., Nikonov V. O., Manukovsky A. Yu., Posmetyev V. V. Computer modeling of the operation of a regenerative rotary conical device of a logging tractor with a trailer-dissolution // Izv. vuzov. Forest Journal 2022 No. 5. pp. 85-99. Access mode: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-85-99>.
12. Posmetyev V. I., Zelikov V. A., Nikonov V. O., Posmetyev V. V., Chuikov A. S., Avdyukhin A. V. The influence of the modes of movement of a logging truck train during the removal of timber on the efficiency of energy recovery in a pneumohydraulic coupling device // Forestry Journal. 2022; 12 (4): 114-129. URL: <https://elibrary.ru/heyhbu>.
13. Vorozhtsov O. V. Hydraulic drive of vehicle energy recovery // Mathematical modeling of systems and processes: materials of the International scientific and practical conference. Pskov State University. Pskov, 2022: 57-62. URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/621413357/?ysclid=lur3sq0jtw809847007>.
14. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators // Energies. 2021; 14 (20): 6566. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206566>.
15. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load // Mechatronics. 2021; 77: 102599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102599>.
16. Vyalov S. A., Rybak A. T., Tsybri I. K., Pelipenko A. Yu. Three-speed hydromechanical reciprocating drive with energy recovery // Assembly in mechanical engineering, instrumentation. 2021; 9: 397-401. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zmqevl&ysclid=lur3um7vby107136240>.
17. Pelipenko A., Rybak A., Sarkisian D., Saakian S., Zhyravlyova A. Stand for Life Tests of Plunger Hydraulic Cylinders // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022; 246: 198–206. DOI: [10.1007/978-3-030-81619-3\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81619-3_22).
18. Popikov P. I., Konyukhov A. V., Popikov S. K., Popikova A. V. Test stand for 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. Volume Part II. – Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after. Emperor Peter I, 2022. pp. 105-110. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49868071>.
19. Fedchenko V. B., Khakimov E. F. Analysis of the layout of a promising Hybrid forwarder with motor wheels // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS : Proceedings of the XLV International Scientific and Practical Conference, Penza, 2020. P. 42-46 (in Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43847657&ysclid=lur443w3fi231074063>.
20. Chetverikova I. V., Zimarin S. V., Burdykin A. V. On the issue of improving the hydraulic drive of a shockless skidding grip // Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the seventh All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation. Petrozavodsk, 2021: 197-199. URL: <https://www.elibrary.ru/rouesk>.
21. Vlasov E. N., Sergeevichev A. V., Dobrynin Yu. A., Sergeevichev V. V. Analysis of the operation of a hydraulic manipulator of a forest machine with a cyclic control system. // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2022; DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.99-112>.

22. Glushkov S., Rybak A. T., Popikov P. I., Uskov V. I., Bogdanov D. S., Konyukhov A. V. Modeling of work processes of an energy-saving hydraulic drive of a lifting mechanism of a forest manipulator// Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering Journal]. – 2021. – Vol. 11. – № 4 (44). – Pp. 88-99. – Bibliogr.: pp. 96-98 (13 titles). – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8.

23. Sokolov A. P. Simulation modeling of wood harvesting processes // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2023. Issue 245. pp. 244-260. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.244-26024.

### Сведения об авторах

*Рыбак Александр Тимофеевич* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», кафедра приборостроения и биомедицинской инженерии, машин, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344003, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9950-3377>, e-mail: 2130373@mail.ru.

*Попиков Пётр Иванович* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: popikovpetr@yandex.ru

*Дручинин Денис Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru.

✉ *Хоменко Константин Геннадьевич* – соискатель, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: ORCID <https://orcid.org/0009-0005-4732-1535>, e-mail: slash4850@yandex.ru

*Попиков Сергей Константинович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>; e-mail: sergpopikov@mail.ru.

### Information about the authors

*Alexander T. Rybak* – Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, Don State Technical University, Department of Instrumentation and Biomedical Engineering, Machines, pl. Gagarina, 1, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9950-3377>, e-mail: 2130373@mail.ru.

*Petr I. Popikov* – Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

*Denis Yu. Druchinin* – Cand. Sci. (Technical Sciences), Associate Professor, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2687>, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru.

✉ *Konstantin G. Khomenko* – applicant, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: ORCID <https://orcid.org/0009-0005-4732-1535>, e-mail: slash4850@yandex.ru.

*Sergei K. Popikov* – postgraduate student, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, sergpopikov@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Научный обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/17>

УДК 676.051.32



## Технико-экономический анализ положений сквозной технологии плантационного лесовыращивания

Сергей В. Фокин<sup>1</sup> ✉, [feht@mail.ru](mailto:feht@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9575-7764>.

Полина Ю. Медведева<sup>1</sup>, [pelageam@mail.ru](mailto:pelageam@mail.ru) <https://orcid.org/0009-0003-9708-4182>

Виктор П. Попиков<sup>2</sup>, [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru) <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», пр-кт им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3., г. Саратов, 410012, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

Источники биомассы, используемой для производства топлива, включают в себя разнообразные ресурсы, такие как остатки лесного и сельскохозяйственного производства, естественную растительность и специально выращиваемые энергетические культуры. Исходя из экологической перспективы, остатки и отходы лесного и сельскохозяйственного производства являются идеальным сырьем для производства биотоплива. Для повышения эффективности лесопромышленного комплекса, российские ученые предлагают использовать сквозные технологические процессы, которые объединяют различные этапы заготовки, транспортировки и переработки биомассы дерева. Конкретный выбор технологий и методов плантационного выращивания лесов играет важную роль в повышении эффективности деятельности лесопромышленных предприятий. Однако анализ зарубежных научных исследований в области энергетического лесного хозяйства показывает недостаток внимания, уделенного изучению технологических процессов получения конечного продукта плантационного лесовыращивания – щепы. Поэтому необходимо провести технико-экономический анализ подобных технологий для того, чтобы полностью раскрыть потенциал данного направления. Включение новых образцов рубильного оборудования, соответствующего современным техническим требованиям, в сквозной технологический процесс плантационного лесовыращивания может обеспечить более надежную энергетическую безопасность, как предприятий лесного комплекса, так и потребителей, у которых отсутствует возможность централизованного обеспечения тепловой энергией.

**Ключевые слова:** *сквозные технологии лесовыращивания, лесные плантации, рубильное оборудование, щепы*

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

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

**Конфликт интересов:** авторы данной статьи заявили об отсутствии личных, коммерческих, идеологических, интеллектуальных конфликтов интересов при подготовке, написании и публикации данной статьи.

**Для цитирования:** Фокин, С. В. Технико-экономический анализ положений сквозной технологии плантационного лесовыращивания / С. В. Фокин, П. Ю. Медведева, В. П. Попиков // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 295–313. – Библиогр.: с. 306–312 (42 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/17>.


*Поступила 18.01.2024. Пересмотрена 02.02.2024. Принята 13.02.2024. Опубликовано онлайн 17.06.2024.*

Review

## Techno-economic analysis of the provisions of end-to-end plantation silviculture technology

Sergei V. Fokin<sup>1</sup>✉, feht@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-9575-7764>

Polina Yu. Medvedeva<sup>1</sup>, pelageam@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0003-9708-4182>

Victor P. Popikov<sup>2</sup>, kafedra.laip@inbox.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>

<sup>1</sup>Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Petr Stolypin ave., 4, pp. 3., Saratov, 410012, Russian Federation

<sup>2</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

### Abstract

Sources of biomass for fuel production include a variety of resources such as forest and agricultural residues, natural vegetation and specially grown energy crops. From an environmental perspective, forest and agricultural residues and residues are ideal feedstocks for biofuel production. In order to increase the efficiency of the forest industry complex, Russian scientists propose to use end-to-end technological processes that combine the various stages of harvesting, transportation and processing of wood biomass. The specific choice of technologies and methods of plantation forest cultivation plays an important role in improving the efficiency of forestry enterprises. However, the analysis of foreign scientific research in the field of energy forestry shows the lack of attention paid to the study of technological processes of obtaining the final product of plantation forest growing - wood chips. Therefore, it is necessary to conduct a technical and economic analysis of such technologies in order to fully unlock the potential of this area. The inclusion of new samples of chopping equipment that meet modern technical requirements in the end-to-end technological process of plantation forest growing can provide more reliable energy security, both for forest enterprises and consumers who do not have the possibility of centralized provision of thermal energy.

**Keywords:** *end-to-end forestry technologies, forest plantations, chopping equipment, wood chips*

**Funding:** this study did not receive external funding.

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

**Conflict of interest:** the authors of this article declared the absence of personal, commercial, ideological, intellectual conflicts of interest in the preparation, writing and publication of this article.

**For citation:** Fokin S. V., Medvedeva P. Yu., Popikov V. P. (2024). Techno-economic analysis of the provisions of end-to-end plantation silviculture technology. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 295-313 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/17>.

*Received* 18.01.2024. *Revised* 02.02.2024. *Accepted* 13.02.2024. *Published online* 17.06.2024.



### Введение

Ситуация, приведшая к энергетическому кризису, заставила людей искать новые источники первичной энергии, в том числе возобновляемые. Тема использования биомассы, в частности древесины, для производства энергии, активно изучается уже давно [1, 2]. С появлением рынка биотоплива ряд исследований был посвящен экономической эффективности производства биомассы [3, 4].

Первым к этому вопросу обратился финский математик О. Хеллманн, который в 1980 году рассмотрел вариант, включающий в себя сегментный состав плантации с числом элементов, равным периоду созревания пород [5, 6].

Каждый год один из сегментов заготавливается весной и высаживается осенью. Впоследствии эта модель стала известна как финская. Позднее О. Хеллманн усовершенствовал эту модель. Он поставил перед собой задачу найти оптимальный возраст заготавливаемой древесины.

В 1982 г. О. Хеллманн рассмотрел тот же вопрос для энергетических плантаций, не требующих ежегодной новой посадки. Такая модель неосуществима, поскольку процент всхожести семян может оказаться незначительным, что обязательно отразится на положительном результате решаемой задачи. В условиях отсутствия дополнительных посадочных работ, рост древесины окажется бессистемным, а заготовка древесины, несомненно, усложнится.

В 1986 году О. Хеллманн привнес новые элементы в свою модель, исследуя возможность выращивания нескольких видов деревьев на одной плантации [7, 8]. Но в своем исследовании он не рассматривал влияние транспортной доступности на экономическую эффективность, а также случайные колебания объемов производства и спроса на топливо для обеспечения надежности поставок с этих плантаций.

Многочисленные исследования М. Borzecka-Walker, М. NordborgE., Rozenka, Н. Krasuska, N. Krasuska, N. Rosenqvist, К. Havlickova были проведены с целью анализа стоимости биотоплива, полученного из энергетических культур, выращиваемых в различных странах, включая Швецию, Чехию и Польшу [7].

Авторами выполнено сравнительное исследование стоимости биотоплива, полученного из мискантуса, конопли и ивы. В свою очередь, Л. Кристерссон и Т. Эрикссон исследовали влияние сельскохозяйственных мероприятий на скорость роста гибридов тополя и ивы в Швеции [8].

В России ученые так же работают над моделированием процессов роста и уборки биомассы. Они провели исследования по созданию функциональной модели биоэнергетического комплекса, которая позволила бы оптимизировать технологические процессы производства биотоплива и выбрать наиболее эффективные решения. Кроме того, они установили количественные соотношения между параметрами комплекса и техническими параметрами оборудования. Однако, экономические аспекты производства биотоплива пока не изучены.

Осуществлению комплексных исследований, охватывающих весь спектр технических процессов, связанных с производством, транспортировкой и хранением биотоплива уделяется мало внимания. Топливообеспечение удаленных населенных пунктов с энергетических плантаций остается недостаточно изученным в научной литературе, особенно в контексте эффективности топливообеспечения из традиционных источников, требующего значительных ресурсов [9, 10].

При анализе эффективности топливообеспечения удаленных населенных пунктов от энергетических плантаций необходимо учитывать стоимость мероприятий по повышению надежности поставок энергетических материалов. Однако, предыдущие исследования не учитывали влияние случайных факторов на надежность топливообеспечения.

Важно рассматривать годовой спрос на топливо, его производство и годовые запасы в качестве случайных величин, так как все три фактора отчасти зависят от непредсказуемых природно-климатических условий. Уже с 60-х годов многие советские ученые проводили исследования длительных колебаний температур и связанных с ними проблем надежности топливообеспечения [11, 12].

Исследования надежности и маневренности топливоснабжения основывались на анализе долгосрочных наблюдений температуры воздуха в раз-

личных местах метеонаблюдений. В качестве репрезентативных точек рассматривались следующие: Екатеринбург для Урала, Барнаул для Западной Сибири, Иркутск для Восточной Сибири и так далее [13].

В данном исследовании приведены результаты анализа воздействия зимних колебаний температуры и продолжительности отопительных периодов на надежность системы теплоснабжения. Для этого были использованы данные о среднемесячных температурах с 1881 года, сгруппированные по экономическим районам СССР.

Важно отметить, что при оценке эффективности энергетических плантаций необходимо учитывать расходы, связанные с обеспечением надежности поставок топлива. Однако, до настоящего времени не было проведено исследований, включающих такие факторы, как годовая потребность в топливе, объем его производства в конкретном году и изменение запасов топлива с течением времени. Эти факторы непосредственно зависят от природно-метеорологических условий.

Исследования, основанные на долгосрочных колебаниях температуры воздуха, внесли значительный вклад в понимание проблемы надежности теплоснабжения. Отдельное внимание следует уделить ученым, которые внесли значительный вклад в данное направление лесовыращивания. К ним можно отнести Я.А. Мазура, А.С. Некрасова, М.А. Великанова, Л.С. Хрилева, В.И. Зоркальцева и других.

Но, несмотря на большое количество исследований, посвященных надежности теплоснабжения объектов различного назначения, до сих пор отсутствуют работы, посвященные этому важному вопросу.

На основе анализа научных исследований по выращиванию энергетических плантаций можно сделать вывод, что до настоящего времени недостаточно внимания уделялось исследованиям, направленным на создание технологических цепочек сквозного производства, включая конечный продукт - щепу.

Поэтому, для обеспечения долгосрочного развития, требуются дальнейшие исследования с целью разработки технологии продолжительного вы-

ращивания лесных культур в условиях среднего Поволжья и разработки соответствующего оборудования.

Таким образом, целью данного исследования является повышение эффективности работы лесного комплекса за счет совершенствования конструкции технологических средств, действующих в рамках сквозного технологического процесса плантационного выращивания леса в условиях степной и лесостепной климатических зон Среднего Поволжья.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследования*

Данная работа является теоретическим изысканием в области плантационного лесовыращивания. Объект исследования: сквозной технологический процесс выращивания лесных плантаций. Предмет исследования: проект по ускоренному выращиванию деревьев с дальнейшей их переработкой на топливную щепу.

Сбор данных. Поиск и сбор материала осуществлялся в соответствии с концепцией предметного обзора [24]. Источниками послужили: единая библиографическая и сводная база данных рецензируемой научной литературы "Scopus"; многофункциональная поисковая платформа научных публикаций "Академия Google"; каталоги компаний Российской Федерации по продаже рубильных машин, размещенные в сети Интернет научные электронные библиотеки "ELibrary.ru" и "КиберЛенинка"; каталоги компаний Российской Федерации по продаже рубильных машин, размещенные в сети Интернет. Поиск осуществлялся по ключевым словам: «энергетические плантации», «топливная щепка», «переработка древесины на щепу», «мобильные рубильные машины», «топливная щепка для мини-котельных», «сквозные технологии лесовыращивания» и их прямые английские эквиваленты. Для сложных запросов использовались соответствующие литеральные операторы поисковых систем [41].

При проведении технико-экономического анализа использовались положения проектных решений по созданию, выращиванию и использованию лесных плантаций, изложенные в работе Л.И. Загидуллиной [8], а также методики определения эффективности от внедрения в производство новой техники [14].

Энергетические лесные плантации - это участки земли, на которых специально выращиваются быстрорастущие, энергонасыщенные или ценные породы деревьев. Они предназначены для производства конечной продукции., которая впоследствии может переработана механическим или химическим способом. На таких плантациях производятся ценные породы древесины, которые отличаются красивой текстурой и могут быть использованы в различных отраслях промышленности, таких как производство мебели или строительные работы. Также на плантациях выращиваются растения, которые используются для производства различных изделий, например, для производства прутьев для плетения, коры для изготовления гутта и эфирных масел, пробки, танинов [15, 16].

Одной из главных задач создания таких плантаций является ускорение процесса выращивания сельскохозяйственной продукции, улучшение ее качества и повышение эффективности использования земельных площадей.

Для ее решения предпринимается активное производство, которое включает химическую обработку, механизацию, мелиорацию и особые методы агротехники. Кроме того, для достижения оптимальных результатов производства, осуществляется тщательный подбор пород деревьев. [15, 16].

В России имеется значительный опыт плантационного выращивания лесных культур. В 1980-х годах было создано примерно 36 тысяч гектаров лесосырьевых плантаций. Однако в 1990-х годах объемы таких работ начали сокращаться и в конечном итоге почти полностью прекратились.

Организация выращивания плантационных лесов включает несколько ключевых аспектов. К ним относятся тщательная обработка почвы перед посадкой, агротехнические процедуры, борьба с болезнями и вредителями, регулярная обрезка, внесение удобрений, орошение и т. д. Такие меры помогают создать простые фитоценозы, то есть перейти от лесоводства к арбористике [17, 18].

Так же в работе использовались общелогические методы исследования в части анализа режимов работы различного рубильного оборудования для древесного сырья, который позволил установить,

что в настоящее время выпускаются рубильные машины со следующими типами механизмов резания древесины [19, 20].

Существует несколько видов рубильных машин, которые различаются видом измельчающего механизма: барабанные, дисковые, роторные, молотковые и шредеры [21, 22, 23].

### Результаты

*Выбор породы.* Существуют два типа плантаций: длительного пользования и циклические, которые начинаются сразу после уборки предыдущего выращивания. При выборе древесных пород следует учесть плотность выращиваемой древесины, так как она является определяющим фактором для теплоты сгорания и интенсивности роста древесной биомассы на протяжении жизни насаждения (табл. 1).

Таблица 1

Плотность древесины в абсолютно сухом состоянии и теплота её сгорания

Table 1

Density of wood in absolutely dry state and its heat of combustion

Порода/ Breed	Плотность древесины, кг/ м <sup>3</sup> / Wood density, kg/m <sup>3</sup>	Теплота сгорания, кВтч/ м <sup>3</sup> / Heat of combustion, kWh/m <sup>3</sup>
Сосна обыкновенная/ Common pine	480	1500
Лиственница сибирская/ Siberian larch	620	1600
Ясень ланцетный/ Lanceolate ash	680	1850
Береза повислая/ Hanging birch	620	1670
Ольха черная/ Black alder	495	1300
Осина/ Aspen	415	1200
Тополь бальзамический/ Poplar balsamic	425	1230
Ива древовидная/ Willow tree	425	1230
Дуб черешчатый/ Petiole oak	700	1850
Клен остролистный/ Sharp leaf maple	653	1670

Источник: открытые данные Интернета

Source: Open Internet data

Обработка данных проводилась на основании «принципа ближайшего соседа». Для решения использовался агломеративный иерархический алгоритм классификации. В качестве расстояния между объектами принято обычное евклидово расстояние. Результаты иерархической классификации объектов представлены на рис. 1 в виде дендрограммы [24, 25, 26].

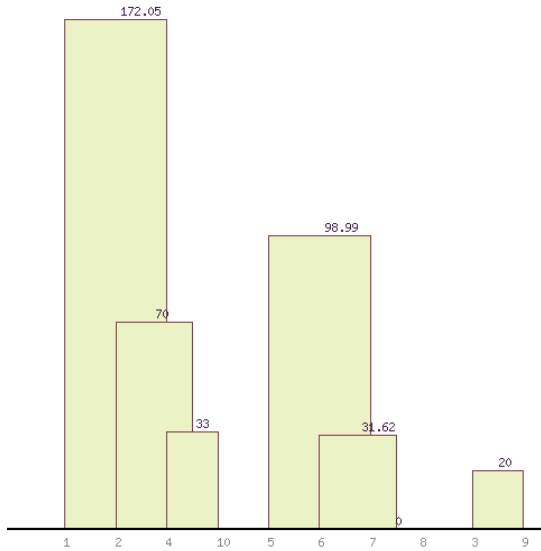


Рисунок 1. Иерархическая классификация пород поплотности древесины в абсолютно сухом состоянии и теплоты её сгорания

Figure 1: Results of hierarchical classification of species according to wood density in absolutely dry state and its calorific value

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

В результате расчета образовано 3 кластера: S(1,2,4,10), S(3,9), S(5,6,7,8). В первый кластер вошли 4 породы: сосна обыкновенная, лиственница сибирская, береза повислая, клен остролистный. Первый кластер представлен породами, имеющими высокую плотность древесины и среднюю по выборке теплоту сгорания. Второй кластер представлен двумя породами: ясень ланцетный, дуб черешчатый. Это породы, имеющие наивысшие показатели в выборке плотности древесины и теплоты сгорания. В третий кластер вошли следующие 4 породы: ольха черная, осина, тополь бальзамический, ива древовидная. Это группа быстрорастущих пород, которые имеют небольшую плотность древесины, но высокие показатели в своей группе теплоты ее сгорания.

Поэтому, руководствуясь значениями теплоты сгорания древесной биомассы пород данного кластера, закладка энергетических плантаций наиболее благоприятна с применением быстрорастущих пород ивы и тополя. Саженьцы данных пород в первые годы жизни имеют высокие показатели роста и накопления биомассы.

Уход за плантациями проводится в зависимости от конечной цели, например, для получения пиловочника производится удаление ветвей и побочных побегов. Технология создания плантационных культур во многом схожа с обычным лесоразведением, однако основное отличие заключается в использовании крупномерных саженцев [27, 28].

Лесные плантации могут быть созданы для разных целей и, это объясняет разнообразие их видов. Важным является регулярное наблюдение за развитием и численностью насекомых. В случае, если вредители представляют реальную угрозу, применяются различные методы борьбы с ними, включая как биологические, так и химические. Кроме того, чтобы обезопасить плантации от диких животных производится ограждение, а также создаются специальные кормовые угодья [31, 32].

Выбор посадочного материала имеет ключевое значение при выращивании плантаций. При этом необходимо учесть происхождение семян и вегетативного материала, генотип деревьев и целевое назначение плантаций.

На примере плантаций, где основной целью является получение плодов кедра, ореха и других культур, следует отбирать особей с высокой плодородностью, крупными плодами и шишками, а также небольшой высотой ствола, чтобы наклон ствола был минимальным [33, 34].

Для выращивания древесины с быстрым темпом прироста необходимо выбирать деревья с большой высотой и диаметром. Также важно учитывать происхождение семян, поскольку нерайонированные семена могут создать нежелательные качества в регионе выращивания. Плантации, созданные с использованием нерайонированного материала, могут также стать неустойчивыми к внешним факторам окружающей среды [35, 36].

При выборе участка для закладки плантаций наибольшее внимание следует уделять плодородности почвы. Перед посадкой растений проводятся планировка участка и тщательная обработка почвы.

Также обеспечивается оптимальный водный режим почвы, для чего на переувлажненных участках проводится мелиорация с помощью дренажных борозд глубиной до 40 см [37, 38].

Для улучшения минерального питания растений используются различные удобрения, а также проводятся известкование и подкисление почв по необходимости. Размещение растений на площади плантаций зависит от биологических особенностей деревьев или кустарников и от целевого назначения культур [39,40].

### Выбор рубильного оборудования

Важным условием успешного создания энергетических плантаций и планирования их территории является разумная организация переработки древесных отходов, возникающих при выращивании плантационных деревьев и переработки древесного сырья для получения конечной продукции. Чтобы решить задачу переработки тонкомерных древесных материалов эффективно, рекомендуется использовать мобильные рубильные машины.

Результаты проведенный анализа режимов работы основных типов рубильных машин представлены в табл. 2. Образцами для сравнительного анализа конструкции рубильного оборудования послужили по 2 экземпляра рубильных машин, отличающихся типом механизма резания. Всего для анализа представлено 10 рубильных машин.

Сравнительный анализ режимов работы рубильных машин проводился методом к-средних, разработанным Маккуином (1967) и на данный момент является одним из наиболее широко используемых неиерархических методов.

Количество кластеров в методе к-средних должно быть определено методом локтя, который является распространенным способом определения соответствующего количества кластеров (рис. 2). С каждым новым кластером общая вариация в каждом кластере становится все меньше и меньше. В крайнем случае, когда кластеров столько, сколько точек, результат равен нулю.

Таблица 2  
Сравнительный анализ режимов работы рубильных машин

Table 2

### Comparative analysis of chipper operating modes

Обозначение машины / Machine designation	Мах.разм.перераб. древесины, мм / Maximum size of wood to be processed, mm	Производительность, м <sup>3</sup> /ч / Capacity, m <sup>3</sup> /h	Уст.мощность, кВт / Installed power, kW
Рубмастер МОБИ-300 (дисковая) / Rubmaster MOBI-300 (disk)	300	40	100,3
PPM – 9 (дисковая) / RRM - 9 (disk)	300	25	100,3
Skorpion 350 SDB (барабанная) /Skorpion 350 SDB (drum)	300	16	63
Gandini 30/60 TPS (барабанная) /Gandini 30/60 TPS (drum)	300	18	110
Мульчер FAE DML (ротаторный) / FAE DML mulcher (rotary)	120	6,5	52
Мульчер Serrat FX4 T2300 (ротаторный) / mulcher Serrat FX4 T2300 (rotary)	280	10,8	110
Дробилка молотковая МД 5х5 / Hammercrusher MD 5×5	100	3,8	22
Молотковая дробилка СМД-112 / Hammercrusher SMD-112	150	4,5	18,5
Шредер PPM-1/ shredder RRM-1	150	0,25	7,5
Шредер ОШВ 600 / shredder OSHV 600	150	1,25	30

Источник: открытые данные производителей оборудования

Source: open data from equipment manufacturers

Однако в большинстве случаев уменьшение общей вариации становится меньше после определенного момента.

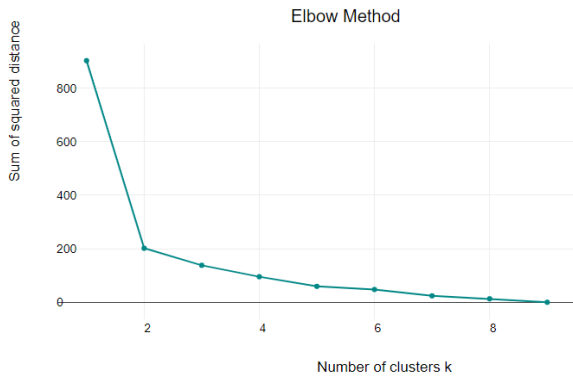


Рисунок 2. Зависимость для выбора количества кластеров при сравнительном анализе режимов работы рубильных машин

Figure 2: Dependence for selecting the number of clusters in the comparative analysis of chopping machine operation modes

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

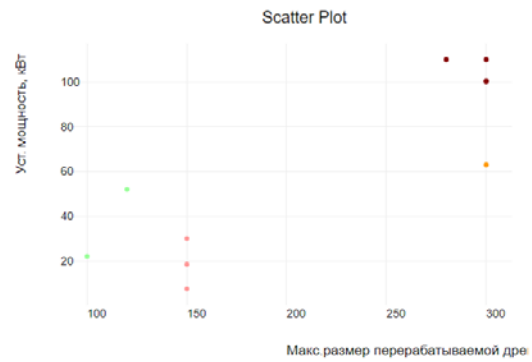


Рисунок 4. Идентификация кластеров при сравнительном анализе параметров конструкций рубильных машин

Figure 4. Identification of cluster in comparative analysis of chipper design parameters

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

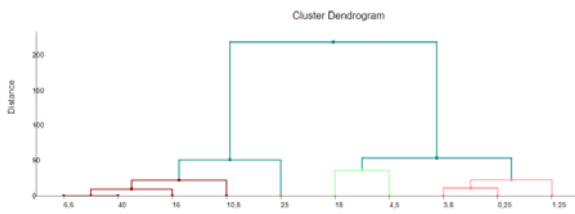


Рисунок 3. Иерархическая классификация рубильного оборудования по режимам работы

Figure 3. Hierarchical classification of chopping equipment by operating modes

Источник: Собственные вычисления авторов  
Source: Authors' own calculations

Затем эта точка используется в качестве оптимального номера кластера. Если рассматриваемые переменные не имеют одинаковой единицы измерения, часто рекомендуется масштабировать данные перед кластерным анализом.

В результате расчета образовано 4 кластера: S(5,7), S(8,9,10), S(3),S(1,2,3,6) (рис. 3). В первый кластер вошли 2 машины: дробилка молотковая МД 5×5, мульчер FAE DML. Первый кластер представлен машинами, имеющими наименьшие показатели режимов работы. Второй кластер представлен тремя измельчителями: шредер ОШВ 600, молотковая дробилка СМД-112, шредер PPM-1.

Это машины, имеющие средние показатели режимов работы в выборке максимального размера перерабатываемой древесины, производительности и установленной мощности.

В третий кластер вошла одна машина: Skorpion 350 SDB. Этот кластер характеризуют высокие значения максимального размера перерабатываемой древесины и средние значения производительности и установленной мощности.

В четвертый кластер определились следующие рубильные машины: Рубмастер МОБИ-300, PPM – 9, Gandini 30/60 TPS и мульчер Serrat FX4 T2300. Данная группа рубильного оборудования обладает наивысшими показателями в выборке максимального размера перерабатываемой древесины, производительности и установленной мощности (рис. 4).

Поэтому, руководствуясь наивысшими значениями показателей режимов работы для переработки продукции плантационных лесов, целесообразно использовать дисковые рубильные машины.

В случае с измельчителями тракторного типа маломощные дисковые дробилки обычно используются в качестве навесного и прицепного оборудования из-за их небольшого веса. Напротив, более мощные устройства, такие как дисковые или барабанные машины с усовершенствованными системами подачи, чаще устанавливаются на прицепах. Большинство прицепов способны развивать скорость до 80 километров в час на дорогах общего пользования, а тяжелые прицепы оснащены тормозами и световыми приборами.

К преимуществам прицепной техники также относится возможность установки бункера для сбора щепы, который обычно оснащен подъемно-поворотной системой для обеспечения быстрой разгрузки. Важно отметить, что мобильные измельчители, подключаемые к ВОМ трактора, имеют ограничения.

Их вес, мощность и, соответственно, производительность ограничены мощностью двигателя трактора. Причем такие машины отличаются большой мобильностью и доступной ценой.

На основе изложенного можно сделать вывод, что для переработки древесного сырья, полученного с лесных плантаций, наиболее целесообразно использовать навесные рубильные машины. При сравнении характеристик серийно производимых дробилок для тонкомерной древесины можно сделать вывод, что наиболее подходящим типом измельчителя является дисковая рубильная машина.

### **Основные технико-экономические показатели проекта плантационного лесовыращивания**

При создании лесных культур при проектировании сквозной технологии лесовыращивания предполагалось в качестве посадочного материала использовать саженцы-барбателлы тополя бальзамического с нормой высадки 2200 шт/га, которые довольно часто используют за рубежом для закладки энергетических плантаций. Барбателла представляет собой черенковый саженец с однолетним побегом и двухлетней корневой системой.

Наилучшим участком для размещения плантации тополя являются заброшенные сельскохозяйственные земли (24 га), расположенные на территории ОГУ «Вязовский лесхоз». Участок расположен в пойме реки, где на влажной почве хорошо растут бальзамические тополя. Участок (категория территории), выбранный для расчетов проекта, относится к залежным землям, лесополосам, бывшим сельскохозяйственным землям, старым невосстановленным лесополосам основных видов и пустошам с удаленными или сгнившими пнями, участкам без естественного возобновления, где возможно постоянное культурное выращивание деревьев (рис. 5). На площади участка предлагается сплошная обработка участка трактором Беларус-3522 с мульчером SERRAT FX5 T2000.



Рисунок 5. Местоположение участка для проведения проектных работ по плантационному лесоразведению  
Figure 5. Location of the site for plantation afforestation project works

Источник: Гугл.Карты  
Source: GoogleMaps

Проект ускоренного выращивания приведет к увеличению производства древесины первого поколения на 30 % по сравнению с традиционным выращиванием бальзамического тополя. Все затраты на создание плантации (24 га) определены в размере 647503,2 рубля. Производительность лесной плантации тополя бальзамического при оптимальном режиме выращивания по годам произрастания возрастает с 80,2 м<sup>3</sup>/га (5 лет) до 1899,1 м<sup>3</sup>/га (15 лет), т.е.

увеличение объема древесного сырья составляет в 23 раза.

При этом следует отметить, что объем произрастания после 10 лет выращивания плантации является значительным 820,5 м<sup>3</sup>/га. Экономическое обоснование проектируемых мероприятий заключается в расчете затрат на закладку лесной плантации и получении дохода от продажи полученной продукции. Результаты исследований показали, что приоритетным, с экономической точки зрения, является срезание древесины тополя бальзамического, выращиваемого на энергетических плантациях в первые 5 лет после высадки культур. Об этом свидетельствует индекс доходности, который у плантаций возрастом 5 лет (4,79) выше индекса доходности плантации возрастом 10 и 15 лет соответственно (4,61).

### **Оценка эффективности применения опытного образца рубильной машины новой конструкции**

Для оценки эффективности применения прототипа в рамках новой технологии лесовосстановления на производственном участке был создан опытный образец (рис. 6, а, б), включающий следующие конструктивные компоненты: трактор, механизм отбора мощности, прицепное устройство, транспортная система для щепы, механизм формования, устройство для загрузки, измельчительный диск с ножами, гидравлический цилиндр, редуктор, система привода механизма подачи, тормозная система, муфта, шасси, система привода рубильного механизма и валы привода редуктора.

Процесс измельчения древесного материала этой машины осуществляется следующим образом: загрузочное устройство машины устанавливается возле скопления древесного сырья [37, 38], осуществляя маневрирование трактора.

Затем, с помощью гидравлического цилиндра, подъемный ковш переводится в рабочее положение, чтобы собранное древесное сырье размещалось на плоскости загрузочного патрона.

Механизм формирования в виде козырьков, размещенных вокруг входного окна загрузочного

патрона, позволяет загрузить тонкомерный материал, который находится вне плоскости приемного окна.

Пальчиковое устройство захватывает древесину, расположенную на поверхности загрузочного ковша. Сырье, которое доставляется, таким образом, в загрузочный патрон, перемещается в зону рубки с помощью подающих валков и подвергается измельчению рубильным диском с ножами.

Часовая продуктивность данной рубильной машины была измерена с использованием хронометра в течение одного часа работы экспериментального дискового измельчителя. Результаты измерений были записаны в специальный журнал наблюдений.

Определение пород деревьев на лесосеке проводилось визуально, а весовые параметры древесного сырья рассчитывались путем обмера с помощью рулонной линейки и последующего пересчета объемных значений в весовые параметры.

Проведенные полевые эксперименты показали, что данная дисковая дробилка способна перерабатывать 38,1 п. м<sup>3</sup>/ч древесного сырья за час работы. Экономические показатели работы новой машины были установлены в соответствии с действующими нормативами.

Стоимость экспериментального варианта измельчителя была определена исходя из стоимости ее комплектующих элементов и составила 409 983,05 руб.

Внедрение новой конструктивной схемы механизма привода позволяет значительно увеличить производительность машины для измельчения тонкомерного древесного сырья. Это особенно актуально для получения более эффективных рабочих параметров процесса получения щепы из продукции плантационных лесов [19, 20].

Проведенные расчеты показывают, что внедрение этой новой техники в производственный процесс плантационного лесовыращивания приводит к годовой экономической результативности в размере 1 263 091,2 руб. Дополнительные капиталовложения окупятся всего за 0,2 года.



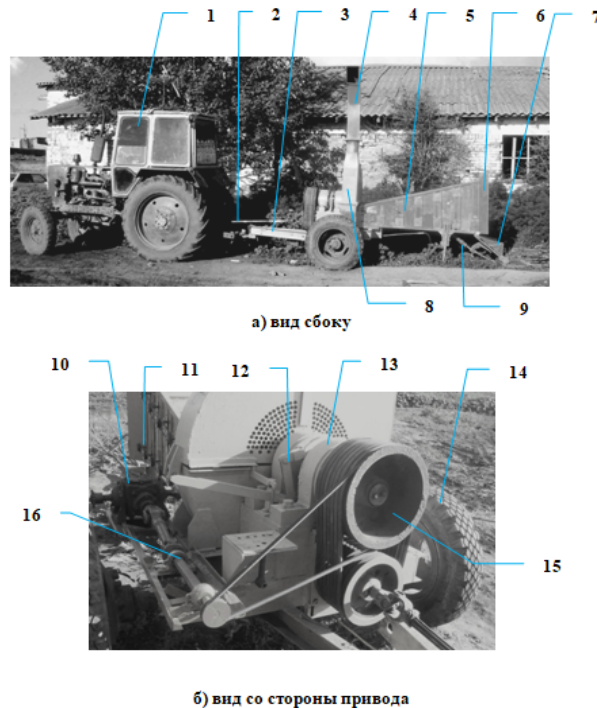


Рисунок 6. Общая схема опытного образца машины для измельчения продукции плантационных лесов  
 Условные обозначения: 1 – трактор; 2 – вал отбора мощности; 3 – прицепное устройство; 4 – щепопровод; 5 – загрузочный патрон; 6 – механизм формования; 7 – загрузочный ковш; 8 – измельчающий диск с ножами; 9 – гидроцилиндр; 10 – редуктор; 11 – система шкивов привода механизма подачи; 12 – ленточный тормоз; 13 – муфта; 14 – шасси; 15 – система шкивов привода рубильного механизма; 16 – валы привода редуктора

Figure 6. General scheme of the prototype machine for product shredding plantation forests

Notation: 1 – tractor; 2 – power take-off shaft; 3 – trailer device; 4 – wood chip pipeline; 5 – loading chuck; 6 – forming mechanism; 7 – loading bucket; 8 – crushing disk with knives; 9 – hydraulic cylinder; 10 – reducer; 11 – pulley system of drive mechanism feed; 12 – belt brake; 13 – clutch; 14 – chassi; 15 – pulley system of drive chopping mechanism; 16 – reducer drive shafts

Источник: собственные фотоснимки авторов

Source: authors' own photos

### Обсуждение

Проведенный в рамках данной работы технико-экономический анализ положений сквозной технологии плантационного лесовыращивания показал практическую значимость проведенных исследований. Аналогичных работ выявлено не было, однако идея плантационного лесоразведения рассматривалась и апробировалась ранее, но в последнее время в РФ она не применяется.

Хотя с увеличением масштабов планетарной экономики возникает все большая потребность в эффективном использовании ископаемых ресурсов, особенно топлива и энергии. В связи с этим, развитые страны активно проводят исследования с целью поиска альтернативных источников энергии.

По прогнозам экспертов, доля ископаемого топлива в мировом энергобалансе должна снизиться до 76 % к 2020 году, 45 % к 2050 году и 30 % к 2060 году. В последние годы особое внимание уделяется использованию древесного топлива, которое считается более экологичным, чем ископаемые источники.

Киотский протокол, принятый в 1998 году, стал важным катализатором процесса развития энергетики на основе древесного топлива. Швеция, Канада, Австрия и США – страны, которые успешно развивают энергетические плантации, специально выращивая леса для использования их биомассы в производстве тепловой и электрической энергии.

Инновационное использование биотоплива на энергетических плантациях позволяет диверсифицировать источники энергии, снизить затраты на электроэнергию в отдаленных населенных пунктах, создать новые рабочие места для местного населения, помочь сохранить ресурсы и уменьшить содержание парниковых газов и других загрязняющих веществ в атмосфере [21].

Новизна рассматриваемых мероприятий заключается том, что в условиях степной и лесостепной природно-климатических применение данных технологий ранее не проводилось. Также новизной обладает предлагаемое рубильное оборудование для переработки древесного сырья в топливную щепу, защищенное патентом РФ на полезную модель.

Результаты проведенного технико-экономического анализа достаточно достоверны, так как они сопоставимы с выводами, проводимых ранее исследований, итоги которых находятся в открытом доступе в сети Интернет.

### Заключение

Лесной кодекс Российской Федерации, вступивший в силу в 2006 году, предусматривает создание и использование лесных насаждений в составе плантаций. В соответствии с положениями кодекса лесные участки предоставляются в аренду гражданам и юридическим лицам для посадки энергетического леса.

Важно отметить, что в начальной стадии формирования лесосырьевых плантаций потребуются существенные финансовые вложения, которые окупятся только через продолжительное время.

Проведенные исследования свидетельствуют о высокой эффективности внедрения прогрессивных технологий в лесной сектор России, но требуется создание высокоэффективных средств для производства и доставки конечной продукции потребителю потому, что мероприятия по ускоренному выращиванию деревьев позволяют увеличить прирост деревьев первого поколения на 30% по сравнению с традиционным выращиванием тополя бальзамического.

Все затраты на создание плантации (24 га) определены в размере 647 503,2 руб., а урожайность лесных плантаций тополя бальзамического при наилучшем варианте выращивания после нескольких лет возрастает с 80,2 м<sup>3</sup>/га (5 лет) до 1899,1 м<sup>3</sup>/га (15 лет), т.е. увеличение объема древесного сырья составляет в 23 раза.

Экономические расчеты показывают, что разработанная нами новая конструкция прицепной дисковой рубильной машины является эффективным способом получения щепы так, как приводит к годовой экономической эффективности в размере 1 263 091,2 руб. Дополнительные капиталовложения окупятся всего за 0,2 года.

### Список литературы

1. Драпалюк М. В. Ресурсосберегающие технологии и техника при плантационном лесовыращивании и заготовке древесного сырья / М. В. Драпалюк, П. И. Попиков // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : Материалы международной научно-практической конференции. 2021. P. 350-357. EDNOIGFWG. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47155573>.
2. Englund X., Dimitriou O., Rosenqvist I. Landscape Metrics and Land-Use Patterns of Energy Crops in the Agricultural Landscape. *Biomass and Bioenergy*. 2023. 1-14. DOI: 10.1007/s12155-023-10584-9.
3. Popp J., Kovács S., Oláh J., Divéki Z., Balázs E. (2021) Bioeconomy: biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnol* 60:76–84. –URL:<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.004>.
4. Shortall O. K., Anker H. T., Sandøe P., Gamborg C. (2019) Room at the margins for energy-crops? A qualitative analysis of stakeholder views on the use of marginal land for biomass production in Denmark. *Biomass Bioenergy* 123:51–58. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.042>.
5. Mola-Yudego B., Xu X., Englund O., Dimitriou I. (2021) Reed canary grass for energy in Sweden: yields, land-use patterns, and climatic profile. *Forests* 12(7): 897. – URL: <https://doi.org/10.3390/f12070897>.
6. Spinelli R., Mihelič M., Kováč B., Heger P., Magagnotti N. (2023). Logging residue chipping options for short rotation poplar plantations. *iForest* 16: 23-29. – DOI: 10.3832/ifer4130-015 [online 2023-01-15].

7. Шишкин А. С. Плантационное лесовыращивание на отвалах / А. С. Шишкин, Р. Т. Мурзакматов // Охрана, инновационное восстановление и устойчивое управление лесами. Forestry–2023. Материалы Международного лесного форума. Воронеж, 2023. С. 236-242. – EDNYKMQDC. – DOI: 10.58168/Forestry2023\_236-242. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54975797>.
8. Загидуллина Л. И. Лесные плантации. Основы создания, выращивания и использования: учебное пособие / Л. И. Загидуллина. – Ульяновск : УлГУ, 2018. – 185 с. – URL: <https://www.ulsu.ru/media/documents.pdf>.
9. Коновалов В. Ф. Селекционно-генетически аспекты плантационного лесовыращивания Pinus Sylvestris в республике Башкортостан / В. Ф. Коновалов, Р. Р. Байтурина, Д. А. Рафикова // Российский электронный научный журнал. 2023. № 1 (47). С. 60-72. - EDN: ZBBIOS. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50383467>. DOI: 10.31563/2308-9644-2023-47-1-60-72.
10. Оценка перспективности использования клонов гибридных топои и осины для плантационного лесовыращивания в условиях Северо-Запада России / А. К. Бойцов, А. В. Жигунов, А. А. Григорьев, А. С. Бондаренко // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. Материалы третьей международной научно-технической конференции. Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова. 2018. С. 40-43. - EDN: XRQBLF. URL: <https://elibrary.ru/xrqblf>.
11. Любов В. К. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива / В. К. Любов, И. И. Цыпнятов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 172–185. - EDN: JSRLLO. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50260969>.
12. Шегельман И. Р. Типизация лесных территорий по природно-производственным условиям на основе кластерного анализа / И. Р. Шегельман, П. В. Будник // Изв. ВУЗов. Лесной журнал, 2021. № 1. С. 120–137. - EDN: XORRKH. - DOI: 10.17238/issn0536-1036. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44729465>.
13. Фокин С. В. Современное состояние лесного и лесоперерабатывающего комплекса Западной Сибири / С.В.Фокин, О.А. Фомина // Материалы II всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современные научно-практические решения в АПК». Государственный аграрный университет Северного Зауралья. 2018. С. 149-152.-EDN: VPOOIN-URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36659898>.
14. 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 т. Курск, 13–14 декабря 2017 года / отв. ред. А.А. Горохов. Т. 5. – Курск : ЗАО «Университетская книга», 2018. – С. 211-213. – EDN YBBGRQ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31736899>.
15. Третьякова И. Н. Плантационное лесовыращивание лиственницы сибирской через технологию соматического эмбриогенеза в культуре in-vitro / И. Н. Третьякова, М. Э. Пак // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. 2021. Т. 24. С. 151-153. EDN: PDIOIU. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47954039>.
16. Фокин С. В. Экологосберегающие технологии при ведении современных агролесомелиоративных мероприятий / С. В. Фокин, О. Н. Шпортько, А. С. Бурлаков // Научная жизнь. 2017. № 7. С. 78-91. EDN: ZHTTGX. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30058020>.
17. Фокин С. В. Об использовании древесных отходов при восстановлении защитных лесных полос / С. В. Фокин, О. Н. Шпортько, В. В. Цыплаков // Научная жизнь. 2015. № 6. С. 134-142. EDN: VJOZRD. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25388509>.
18. Каракчиева И. В. Система оценки экономической доходности древесных ресурсов леса и экономической доступности лесных участков / И. В. Каракчиева, С. И. Чумаченко // Фундаментальные исследования. 2016. № 7-2. С. 372–377. EDN: WGCGIZ. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26417157>.
19. Фокин С. В. Об основных видах энергетической древесины / С. В. Фокин, О. А. Фомина // Forest Engineering : материалы научно-практической конференции с международным участием. 2018. С. 273-276. EDN: SMBQRR. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35278500>.

20. Fokin S., Eskov D., Medvedeva P. (2022). On clearing agricultural land from undesirable vegetation as a way to improve soil fertility. *BIO Web of Conferences*. 43. 02029. 10.1051/bioconf/20224302029.-EDN: ZIPPLT-DOI: 10.1051/bioconf/20224302029- URL:<https://elibrary.ru/item.asp?id=50001765>.
21. Фокин С. В. О перспективных конструкциях рубительных машин / С. В. Фокин, Э. А. Ахметов // *Аграрный научный журнал*. 2020. № 7. С. 85-88. – EDN: MVPDBZ. – DOI: 10.28983/asj.y2020i7pp85-88. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43561102>.
22. Фокин С. В. Способы транспортирования щепы из рубительных машин / С. В. Фокин, О. А. Фомина // *Научная жизнь*. 2018. № 2. С. 10-15. - EDN: YVTTJL. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32788506>.
23. Fokin S., Eskov D., Medvedeva P., Shportko O., Fomina O. (2021). On technical means of obtaining wood chips, as a way to increase soil fertility. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 723. 042025. 10.1088/1755-1315/723/4/042025. - EDN: BWAKIW. – DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042025. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46022403>.
24. 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/spfr.2021.257. – EDN UUDXHJ. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48003100>.
25. Фомина О. А. К обоснованию конструктивных параметров щепопроводарубительной машины для измельчения отходов лесозаготовок / О. А. Фомина, С. В. Фокин, А. В. Касторнова // *Аграрный научный журнал*. 2023. № 3. С. 154-159. - EDN: YEZGLS. – DOI: 10.28983/asj.y2023i3pp154-159. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50403292>.
26. Фокин С. В. К обоснованию конструктивно-технологических параметров механизма выброса щепы из дисковой рубительной машины / С. В. Фокин, О. А. Фомина // *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2021. Т. 25. № 2. С. 99-107. - EDN: AQHUAB. - DOI: 10.18698/2542-1468-2021-2-99-107. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45662503>.
27. Rowe R., Keith A., Elias D., Mcnamara N. (2020). Soil carbon stock impacts following reversion of *Miscanthus × giganteus* and short rotation coppice willow commercial plantations into arable cropping. *GCB Bioenergy*. 12. 10.1111/gcbb.12718.-DOI:10.1111/gcbb.12718. - URL :[https://www.researchgate.net/publication/342018705\\_Soil\\_carbon\\_stock\\_impacts\\_following\\_reversion\\_of\\_Miscanthus\\_giganteus\\_and\\_short\\_rotation\\_coppice\\_willow\\_commercial\\_plantations\\_into\\_arable\\_cropping](https://www.researchgate.net/publication/342018705_Soil_carbon_stock_impacts_following_reversion_of_Miscanthus_giganteus_and_short_rotation_coppice_willow_commercial_plantations_into_arable_cropping).
28. Технологический алгоритм производства продукции из порубочных остатков / А. П. Мохирев, К. П. Рукомойников, М. М. Герасимова, С. О. Медведев, М. А. Зырянов // *Изв. вузов. Лесн. журн*. 2023. № 1. С. 153–171. – EDN: RMNTFL. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-153-171>. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rmntfl>.
29. Паршина Е. И. Платационное выращивание *Pinus sibirica* Du Tour в среднетаежной зоне Республики Коми / Е. И. Паршина, О. В. Дымова, Е. В. Титов // *Изв. вузов. Лесн. журн*. 2023. № 3. С. 195–204. EDN: NTEOKN. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-195-204>. URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53987640>.
30. Платонов А. А. Комплексное управление лесной растительностью: этапы и перспективы развития / А. А. Платонов // *Лесотехнический журнал*. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 142–157. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/8>. - URL: <http://lestehjournal.ru/journal/2023/no-2-50/kompleksnoe-upravlenie-lesnoy-rastitelnostyu-etapy-i-perspektivy-razvitiya>.
31. Xu X., Mola-Yudego Blas. (2021) Where and when are plantations established? Land-use replacement patterns of fast-growing plantations on agricultural land. *Biomass and Bioenergy*. 144. 105921. 10.1016/j.biombioe.2020.105921. DOI:10.1016/j.biombioe.2020.105921. URL:[https://www.researchgate.net/publication/347890804\\_Where\\_and\\_when\\_are\\_plantations\\_established\\_Land-use\\_replacement\\_patterns\\_of\\_fast-growing\\_plantations\\_on\\_agricultural\\_land](https://www.researchgate.net/publication/347890804_Where_and_when_are_plantations_established_Land-use_replacement_patterns_of_fast-growing_plantations_on_agricultural_land).
32. Морозов, А. Е. Формирование естественных и искусственных молодняков на сплошных вырубках / А. Е. Морозов, В. Н. Южаков // *Молодой ученый. Международный научный журнал. Экология*. – 2022. – № 5 (400). – С. 296–298. – EDN: DNRPEO-URL: <https://elibrary.ru/dnrpeo>.

33. Hale D., Morzillo A. Landscape characteristics and social factors influencing attitudes toward roadside vegetation management. *Landscape Ecology*. 2020;35(9): 2029. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01078-6> URL:[https://www.researchgate.net/publication/343413576\\_Landscape\\_characteristics\\_and\\_social\\_factors\\_influencing\\_attitudes\\_toward\\_roadside\\_vegetation\\_management](https://www.researchgate.net/publication/343413576_Landscape_characteristics_and_social_factors_influencing_attitudes_toward_roadside_vegetation_management).
34. Bollenbacher B. L.; Graham R. T.; Reynolds K. M. Regional forest landscape restoration priorities: Integrating historical conditions and an uncertain future in the Northern Rocky Mountains. *J. For.* 2014, 112, 474–483, DOI:10.5849/jof.13-086. URL: [https://www.researchgate.net/publication/265390429\\_Regional\\_Forest\\_Landscape\\_Restoration\\_Priorities\\_Integrating\\_Historical\\_Conditions\\_and\\_an\\_Uncertain\\_Future\\_in\\_the\\_Northern\\_Rocky\\_Mountains](https://www.researchgate.net/publication/265390429_Regional_Forest_Landscape_Restoration_Priorities_Integrating_Historical_Conditions_and_an_Uncertain_Future_in_the_Northern_Rocky_Mountains).
35. Manner J., Ersson B. T. Mechanized tree planting in Nordic forestry: Simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. *J. For. Sci.* 2021, 67, 242–246, DOI:10.17221/203/2020-JFS.- URL:[https://www.researchgate.net/publication/351545154\\_Mechanized\\_tree\\_planting\\_in\\_Nordic\\_forestry\\_simulating\\_a\\_machine\\_concept\\_for\\_continuously\\_advancing\\_site\\_preparation\\_and\\_planting](https://www.researchgate.net/publication/351545154_Mechanized_tree_planting_in_Nordic_forestry_simulating_a_machine_concept_for_continuously_advancing_site_preparation_and_planting).
36. Ramantswana M., Guerra, S., Ersson B. T. (2020). Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. *Current Forestry Reports*. 6. 10.1007/s40725-020-00114-7. DOI: 10.1007/s40725-020-00114-7 - URL: [https://www.Researchgate.net/publication/341108827\\_Advances\\_in\\_the\\_Mechanization\\_of\\_Regenerating\\_Plantation\\_Forests\\_a\\_Review/citation/download](https://www.Researchgate.net/publication/341108827_Advances_in_the_Mechanization_of_Regenerating_Plantation_Forests_a_Review/citation/download).
37. Arenas J., Escudero A., Mola I., Casado M. Roadsides: An opportunity for biodiversity conservation. *Applied Vegetation Science*. 2017; 20(4): 527. DOI: <https://doi.org/10.1111/avsc.12328>. URL: [https://www.researchgate.net/publication/318330588\\_Roadsides\\_An\\_opportunity\\_for\\_biodiversity\\_conservation](https://www.researchgate.net/publication/318330588_Roadsides_An_opportunity_for_biodiversity_conservation).
38. Korshun, V. Energy efficiency in forestry machinery / V. Korshun, I. Kuchar, A. Kamaukhov // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", EastConf 2019, Vladivostok, March 01–02 2019. – Vladivostok, 2019. – P. 8725311. – EDN: JZPYIO-DOI 10.1109/Eastonf.2019.8725311. - URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41697018>.
39. Любов В. К. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива / В. К. Любов, И. И. Цыпнятов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 172–185. EDN: JSRLL0. DOI:<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50260969>.
40. Gonsamo A., D'odorico P., Pellikka P. Measuring fractional forest canopy element cover and openness – definitions and methodologies revisited. *Oikos*. 2013; 122(9): 1283. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2013.00369.x>. URL: [https://www.researchgate.net/publication/236158594\\_Measuring\\_fractional\\_canopy\\_element\\_cover\\_and\\_openness\\_-\\_definitions\\_and\\_methodologies\\_revisited](https://www.researchgate.net/publication/236158594_Measuring_fractional_canopy_element_cover_and_openness_-_definitions_and_methodologies_revisited).
41. Патент на полезную модель № 221 248 U1 , МПК В27L 11/00 (2006.01), А01G 23/00 (2006.01), СПКВ27L 11/00 (2023.08), А01G 23/00 (2023.08) Устройство для измельчения порубочных остатков / Фокин С. В, Медведева П. Ю.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Вавиловский университет. – № 2023123326; заявл. 08.09.2023; опубл. 26.10.2023 Бюл. № 30.
42. 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>.

### References

1. Drapalyuk, M. V. Resource-saving technologies and techniques in plantation forest growing and harvesting of wood raw materials / M. V. Drapalyuk, P. I. Popikov // In Collection: Energy efficiency and energy saving in modern production and society. Materials of the international scientific-practical conference. 2021. P. 350-357. -EDNOIGFWG (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47155573>.
2. Englund X., Dimitriou O., Rosenqvist I. Landscape Metrics and Land-Use Patterns of Energy Crops in the Agricultural Landscape. *Biomass and Bioenergy*. 2023. 1-14. DOI: 10.1007/s12155-023-10584-9.

3. Popp J., Kovács S., Oláh J., Divéki Z., Balázs E. (2021) Bioeconomy: biomass and biomass-based energy supply and demand. *New Biotechnol* 60:76–84. – URL:<https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.004>.
4. Shortall O. K., Anker H. T., Sandøe P., Gamborg C. (2019) Room at the margins for energy-crops? A qualitative analysis of stakeholder views on the use of marginal land for biomass production in Denmark. *Biomass Bioenerg* 123: 51–58. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.042>.
5. Mola-Yudego B., Xu X., Englund O., Dimitriou I. (2021) Reed canary grass for energy in Sweden: yields, land-use patterns, and climatic profile. *Forests* 12(7): 897. – URL: <https://doi.org/10.3390/f12070897>.
6. Spinelli R., Mihelič M., Kováč B., Heger P., Magagnotti N. (2023). Logging residue chipping options for short rotation poplar plantations. *Forest* 16: 23-29. – doi: 10.3832/for4130-015 [online 2023-01-15].
7. Shishikin, A. S. Plantation silviculture on dumps / A. S. Shishikin, R. T. Murzakmatov // Protection, innovative restoration and sustainable forest management. *Forestry – 2023 : materials of the International Forestry Forum. Voronezh, 2023. P. 236-242. - EDN YKMQDC. DOI: 10.58168/Forestry2023\_236-242 (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54975797*.
8. Zagidullina, L. I. Forest plantations. Fundamentals of creation, cultivation and use: textbook / L. I. Zagidullina. - Ulyanovsk: UISU, 2018. - 185 p. (In Russ.). URL:<https://www.ulsu.ru/media/documents.pdf>.
9. Konovalov, V.F. Breeding and genetic aspects of plantation forest growing of *Pinus Sylvestris* in the Republic of Bashkortostan / V. F. Konovalov, R. R. Baiturina, D. A. Rafikova // Russian electronic scientific journal. 2023. № 1 (47). P. 60-72. EDN: ZBBIOC. URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50383467>.(In Russ.)DOI:10.31563/2308-9644-2023-47-1-60-72.
10. Evaluation of the prospects of hybrid topoi and aspen clones for plantation cultivation in the North-West of Russia / A. K. Boitsov, A. V. Zhigunov, A. A. Grigoriev, A. S. Bondarenko // Forests of Russia: politics, industry, science, education. Proceedings of the third international scientific and technical conference: St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov. 2018. P. 40-43-EDN: XRQBLF-(In Russ.). URL:<https://elibrary.ru/xrqblf>.
11. Lyubov V. K. Increasing the efficiency of energy utilization of biofuel / V. K. Lyubov, I. I. Tsypnyatov // *Izv. vuzov. Lesn. zhurn.* 2023. № 1. P. 172–185. EDN: JSRLLQ. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185> (In Russ.). URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50260969>.
12. Shegelman, I. R. Typization of forest areas by natural and production conditions on the basis of cluster analysis / I. R. Shegelman, P. V. Budnik // *Iz.VUZ Forestry Journal*, 2021. № 1.P. 120–137. EDN: XORRKH. DOI: 10.17238/issn0536-1036-(In Russ.). URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44729465>.
13. Fokin, S.V. Modern state of the forest and timber processing complex of Western Siberia / S. V. Fokin, O. A. Fomina // Proceedings of the II All-Russian (national) scientific-practical conference "Modern scientific and practical solutions in agroindustrial complex". Fomina // Proceedings of the II All-Russian (national) scientific-practical conference "Modern scientific and practical solutions in agroindustrial complex". State Agrarian University of the Northern Trans-Urals. 2018. P. 149-152. EDN: VPOOIN (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36659898>.
14. Shamsutdinova A. I. Introduction of innovations in forestry of the Russian Federation and prospects for their development / A. I. Shamsutdinova, G. F. Ilalova, A. R. Mukhtarova // Science of young people - the future of Russia : Collection of scientific articles of the 2nd International Scientific Conference of promising developments of young scientists. In 5 vol., Kursk, December 13-14, 2017 / Editor-in-Chief A.A. Gorokhov. Vol. 5. Kursk: Closed Joint Stock Company "Universitetskaya kniga", 2018. P. 211-213. EDN YBBGRQ (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=31736899>.
15. Tretyakova I. N. Plantation silviculture of Siberian larch through the technology of somatic embryogenesis in in-vitro culture / I. N. Tretyakova, M. E. Pak // Fruit growing, seed production, introduction of woody plants. 2021. Vol. 24. P. 151-153. EDN: PDIOIU (In Russ.). URL:<https://elibrary.ru/item.asp?id=47954039>.
16. Fokin, S. V. Ecological-saving technologies in the conduct of modern agroforestry measures / S. V. Fokin, O. N. Shportko, A. S. Burlakov // *Scientific Life*. 2017. № 7. P. 78-91. EDN: ZHTTGX (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30058020>.

17. Fokin S. V. On the use of wood waste in the restoration of protective forest belts / S. V. Fokin, O. N. Shportko, V. V. Tsyplakov // *Scientific Life*. 2015. № 6. P. 134-142. EDN: VJOZRD (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25388509>.
18. Karakchieva, I. V. System for assessing the economic profitability of woody forest resources and economic availability of forest areas / I. V. Karakchieva, S. I. Chumachenko // *Fundamental Research*. 2016. № 7-2. P. 372-377. (In Russ.) EDN: WGCGIZ. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26417157>.
19. Fokin S. V. About the main types of energy wood / S. V. Fokin, O. A. Fomina // *Forest Engineering. materials of the scientific-practical conference with international participation*. 2018. P. 273-276 (In Russ.). EDN: SMBQRR. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35278500>.
20. Fokin S., Eskov D., Medvedeva P. (2022). On clearing agricultural land from undesirable vegetation as a way to improve soil fertility. *BIO Web of Conferences*. 43. 02029. 10.1051/bioconf/20224302029. EDN: ZIPPLT. DOI: 10.1051/bioconf/20224302029 (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50001765>.
21. Fokin S. V., Akhmetov E. A. About promising designs of chipping machines // *Agrarny nauchny zhurnal*. 2020. № 7. P. 85-88. EDN: MVPDBZ. DOI: 10.28983/asj.y2020i7pp85-88. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43561102>.
22. Fokin S. V., Fomina O. A. Methods for transporting chips from chippers // *Scientific Life*. 2018. № 2. P. 10-15. EDN: YVTTJL (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32788506>.
23. Fokin S., Eskov D., Medvedeva P., Shportko O., Fomina O. (2021). On technical means of obtaining wood chips, as a way to increase soil fertility. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 723. 042025. 10.1088/1755-1315/723/4/042025. EDN: BWAKIW. DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042025. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46022403>.
24. Tikhonova E. V. Review of the subject field as a method of synthesizing scientific data / E. V. Tikhonova, N. M. Shlenskaya // *Storage and processing of agricultural raw materials*. 2021. № 3. P. 11-25. DOI 10.36107/spfp.2021.257. EDN UUDXHJ (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48003100>.
25. Fomina O. A., Fokin S. V., Kastornova A. V. On justifying the design parameters of a woodchip chipper for shredding logging waste // *Agrarny nauchny zhurnal*. 2023. № 3. P. 154-159. EDN: YEZGLS. DOI: 10.28983/asj.y2023i3pp154-159 (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50403292>.
26. Fokin S. V. To the substantiation of design and technological parameters of the mechanism of chip ejection from the disk chipper / S. V. Fokin, O. A. Fomina // *Forestry Bulletin*. *Forestry Bulletin*. 2021. T. 25. NO. 2.P. 99-107. EDN: AQHUAB. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-2-99-107. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45662503>.
27. Rowe R., Keith A., Elias D., Mcnamara N. (2020). Soil carbon stock impacts following reversion of *Miscanthus × giganteus* and short rotation coppice willow commercial plantations into arable cropping. *GCB Bioenergy*. 12. 10.1111/gcbb.12718. DOI:10.1111/gcbb.12718. URL: [https://www.researchgate.net/publication/342018705\\_Soil\\_carbon\\_stock\\_impacts\\_following\\_reversion\\_of\\_Miscanthus\\_giganteus\\_and\\_short\\_rotation\\_coppice\\_willow\\_commercial\\_plantations\\_into\\_arable\\_cropping](https://www.researchgate.net/publication/342018705_Soil_carbon_stock_impacts_following_reversion_of_Miscanthus_giganteus_and_short_rotation_coppice_willow_commercial_plantations_into_arable_cropping).
28. Technological algorithm for production of products from felling residues / A. P. Mokhirev, K. P. Rukomoynikov, M. M. Gerasimova, S. O. Medvedev, M. A. Zyryanov // *Izv. of universities. Lesn.zhurn*. 2023. № 1. C. 153-171. EDN: RMNTFL. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-153-171> (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rmntfl>.
29. Parshina E. I., Dymova O. V., Titov E. V. Plantation cultivation of *Pinussibirica*DuTour in the middle taiga zone of the Komi Republic // *Izv. vuzov. Lesn.zhurn*. 2023. № 3. P. 195–204. EDN: NTEOKN. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-195-204> (In Russ.). URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53987640>.
30. Platonov, A. A. Integrated forest vegetation management: stages and prospects of development / A. A. Platonov // *Lesotechnicheskiy zhurnal*. 2023. Vol. 13. № 2 (50). P. 142-157. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/8>. (In Russ.). URL: <http://lestehjournal.ru/journal/2023/no-2-50/kompleksnoe-upravlenie-lesnoy-rastitelnostyu-etapy-i-perspektivy-razvitiya>.

31. Xu X., Mola-Yudego Blas. (2021). Where and when are plantations established? Land-use replacement patterns of fast-growing plantations on agricultural land. *Biomass and Bioenergy*. 144. 105921. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105921.
32. Morozov A. E. Formation of natural and artificial young trees on clearcuts / A. E. Morozov, V. N. Yuzhakov // *Young Scientist. International scientific journal. Ecology*. - 2022. - № 5 (400). - P. 296-298. - EDN: DNRPEO (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/dnrpeo>.
33. Hale D., Morzillo A. Landscape characteristics and social factors influencing attitudes toward roadside vegetation management. *Landscape Ecology*. 2020;35(9): 2029. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01078-6>.
34. Bollenbacher B. L., Graham R. T., Reynolds K. M. Regional Forest landscape restoration priorities: Integrating historical conditions and an uncertain future in the Northern Rocky Mountains. *J. For.* 2014, 112, 474–483, DOI: 10.5849/jof.13-086. URL: [https://www.researchgate.net/publication/265390429\\_Regional\\_Forest\\_Landscape\\_Restoration\\_Priorities\\_Integrating\\_Historical\\_Conditions\\_and\\_an\\_Uncertain\\_Future\\_in\\_the\\_Northern\\_Rocky\\_Mountains](https://www.researchgate.net/publication/265390429_Regional_Forest_Landscape_Restoration_Priorities_Integrating_Historical_Conditions_and_an_Uncertain_Future_in_the_Northern_Rocky_Mountains).
35. Manner J., Ersson B. T. Mechanized tree planting in Nordic forestry: Simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. *J. For. Sci.* 2021, 67, 242–246. DOI:10.17221/203/2020-JFS. URL: [https://www.researchgate.net/publication/351545154\\_Mechanized\\_tree\\_planting\\_in\\_Nordic\\_forestry\\_simulating\\_a\\_machine\\_concept\\_for\\_continuously\\_advancing\\_site\\_preparation\\_and\\_planting](https://www.researchgate.net/publication/351545154_Mechanized_tree_planting_in_Nordic_forestry_simulating_a_machine_concept_for_continuously_advancing_site_preparation_and_planting).
36. Ramantswana M., Guerra S., Ersson B. T. (2020). Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. *Current Forestry Reports*. 6. 10.1007/s40725-020-00114-7. DOI: 10.1007/s40725-020-00114-7. URL: [https://www.researchgate.net/publication/341108827\\_Advances\\_in\\_the\\_Mechanization\\_of\\_Regenerating\\_Plantation\\_Forests\\_a\\_Review/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/341108827_Advances_in_the_Mechanization_of_Regenerating_Plantation_Forests_a_Review/citation/download).
37. Arenas J., Escudero A., Mola I., Casado M. Roadsides: An opportunity for biodiversity conservation. *Applied Vegetation Science*. 2017; 20(4): 527. DOI: <https://doi.org/10.1111/avsc.12328>. URL: [https://www.researchgate.net/publication/318330588\\_Roadsides\\_An\\_opportunity\\_for\\_biodiversity\\_conservation](https://www.researchgate.net/publication/318330588_Roadsides_An_opportunity_for_biodiversity_conservation).
38. Korshun V. Energy efficiency in forestry machinery / V. Korshun, I. Kuchar, A. Kamaukhov // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", EastConf 2019, Vladivostok, March 01–02 2019. Vladivostok, 2019. P. 8725311. EDN: JZPYIO. DOI 10.1109/Eastconf.2019.8725311. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41697018>.
39. Lyubov, V. K. Increasing the efficiency of energy use of biofuel / V. K. Lyubov, I. I. Tsypnyatov // *Izv. vuzov. Lesn. zhurn.* 2023. № 1. P. 172–185. EDN: JSRLLO. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-172-185>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50260969>.
40. Gonsamo A., D'odorico P., Pellikka P. Measuring fractional forest canopy element cover and openness – definitions and methodologies revisited. *Oikos*. 2013;122(9):1283. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2013.00369.x>. URL: [https://www.researchgate.net/publication/236158594\\_Measuring\\_fractional\\_canopy\\_element\\_cover\\_and\\_openness\\_-\\_definitions\\_and\\_methodologies\\_revisited](https://www.researchgate.net/publication/236158594_Measuring_fractional_canopy_element_cover_and_openness_-_definitions_and_methodologies_revisited).
41. Patent for utility model No. 221 248 U1, IPC B27L 11/00 (2006.01), A01G 23/00 (2006.01), SPCB27L 11/00 (2023.08), A01G 23/00 (2023.08) Device for chopping felling residues / Fokin S. V., Medvedeva P. Yu. ; applicant and patentee FGBOU VO Vavilov University. - No. 2023123326; application.08.09.2023; publ. 26.10.2023 Bul. No. 30. (In Russ.).
42. Assessment of the feasibility of using motorized blocks and mini-tractors for mechanization of work in forest nurseries / M. A. Nikulin, V. A. Ivannikov, S. S. Samoilenkov, M. K. Asmolovsky // *Forest Engineering Journal*. - 2023. - T. 13.- № 3 (51). - C. 143-163. - DOI: [https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/11.-\(In\\_Russ.\)](https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/11.-(In_Russ.)).



### Сведения об авторах

✉ *Фокин Сергей Владимирович* – д-р тех. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», пр-кт им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3., г. Саратов, 410012, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-7764>, e-mail: [feht@mail.ru](mailto:feht@mail.ru).

*Медведева Полина Юрьевна* – аспирант, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», пр-кт им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3., г. Саратов, 410012, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9708-4182>, e-mail: [pelageam@mail.ru](mailto:pelageam@mail.ru).

*Попиков Виктор Петрович* – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>, e-mail: [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru).

### Information about the authors

✉ *Sergey V. Fokin* – Dr. Sci. (Technical Sciences), Professor, N.I. Vavilov Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering, Petr Stolypin Ave., zd. 4, p. 3., Saratov, 410012, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-7764>, e-mail: [feht@mail.ru](mailto:feht@mail.ru).

*Polina Yu. Medvedeva* – postgraduate student, N.I. Vavilov Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering, Petr Stolypin Ave., zd. 4, p. 3., Saratov, 410012, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9708-4182>, e-mail: [pelageam@mail.ru](mailto:pelageam@mail.ru).

*Victor P. Popikov* – Cand. Sci. (Technical Sciences), Associate Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2499-2772>, e-mail: [kafedra.laip@inbox.ru](mailto:kafedra.laip@inbox.ru).

✉ – Для контактов | Corresponding author

# ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2024 Том 14 № 2 (54)

Подписано в печать 17.06.2024. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет XX.XX.2024. Цена р.

Усл. печ. л. 39,37. Уч.-изд. л. 69,45. 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

Отпечатано в Участке оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

# LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific journal

**2024 Vol. 14 № 2 (54)**

Signed to be published 17.06.2024. Format 60×90 1/8.

Publication date XX.XX.2024. Price rub.

Cond. print. sh. 39,37. Acc.-print. sh. 69,45. 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