

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
2023 Том 13 № 2 (50)

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

Председатель редакционной коллегии

д.т.н., проф. М.В. Драпалюк

Главный редактор

д.т.н., проф. А.И. Новиков

Состав редакционной коллегии

д.с.-х.н., проф., академик РАН Н.Н. Дубенок (Россия)

д.с.-х.н., гл. науч. сотр., академик РАН К.Н. Кулик (Россия)

д.с.-х.н., проф., чл.-корр. РАН А.А. Мартынюк (Россия)

д.б.н., проф., чл.-корр. РАН А.А. Сири́н (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., доц. 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. 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», 2023

LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific Journal

2023 Vol. 13 № 2 (50)

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

Editorial Board Head

Dr., prof. M.V. Drapalyuk

Editor-in-Chief

Dr., prof. A.I. Novikov

Members of editorial board

- Dr., prof., RAS academician N.N. Dubenok (Russia)
Dr., prof., RAS academician K.N. Kulik (Russia)
Dr., prof. RAS corr. member A.A. Martynyuk (Russia)
Dr., prof. A.A. Sirin (Russia) 2012-2023
Dr., prof. D.N. Afonichev (Russia)
Dr., prof. E.V. Ageev (Russia)
Dr., prof. L.I. Belchinskaya (Russia)
Dr., prof. N.N. Matveev (Russia)
Dr., prof. S.M. Matveev (Russia)
Dr., prof. A.A. Gusev (Russia)
Dr., prof. K.V. Krutovsky (Russia, Germany)
Dr., prof. S.S. Morkovina (Russia)
Dr. J. Remes (Czech Republic)
Dr., prof. 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. Ivetić (Serbia)
Dr., prof. Kyu-Suk Kang (Republic of Korea)
Dr. A. Montagnoli (Italy)
Dr. Yong Pang (PRC)
Dr., prof. Z. Govedar (Republic of Srpska/B&H)
Dr., prof. A. Kheloufi (Algeria)
Dr., prof. C. Palaghianu (Romania)

Editor

PhD in Philology E.A. Prytkova

Typesetting

PhD in Philology E.A. Prytkova

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

Registration certificate

PI № FS77-66384 of 14.07.2016

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

PS FSBEI HE «VSUFT»

394087, Voronezh, Timiryazeva str., 8,

telephone (473) 253-72-90,

fax (473) 253-76-51,

e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© FSBEI HE «VSUFT», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

- Графова Е.О., Сюнёв В.С., Горбач В.В.** Анализ факторов негативного воздействия лесозаготовительного производства на природную среду Северо-Западного региона РФ 5
- Исаков И.Ю., Табацкая Т.М., Внукова Н.И., Машкина О.С., Михин В.И., Говедар З.** Фенотипическая и генетико-селекционная оценка березы повислой и березы пушистой *ex situ* и *in vitro* 25

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Ермакова М.В.** Формирование структурно-функциональной организации молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) смешанного искусственно-естественного происхождения в условиях сосняков ягодникового и разнотравного Среднего Урала 43
- Новиков А.И., Ребко С.В., Новикова Т.П., Петрищев Е.П.** Влияние индивидуальной массы семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30-дневное прорастание в 40-ячеистых SideSlit-контейнерах 59

ТЕХНОЛОГИИ.

МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Дорняк О.Р., Маркова Л.В., Попиков С.К., Танчук П.В.** Статическое нагружение силового гидропривода звеньев манипулятора лесотранспортной машины в критическом режиме 87
- 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 105
- Малюков С.В., Лысыч М.Н., Бухтояров Л.Д., Поздняков Е.В., Гнусов М.А., Шавков М.В., Петков А.Ф.** Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий 128
- Платонов А.А.** Комплексное управление лесной растительностью: этапы и перспективы развития 142

CONTENTS

NATURAL SCIENCES AND FOREST

- Grafova E.O., Syunev V.S., Gorbach V.V.** The negative impact factor analysis to the environment from logging production in the North-West region of the Russian Federation 5
- Isakov I. Yu., Tabatskaya T. M., Vnukova N. I., Mashkina O. S., Mikhin V.I., Govedar Z.** Phenotypical and genetic breeding evaluation silver birch and downy birch *ex situ* and *in vitro* 25

NATURE MANAGEMENT

- Ermakova M.V.** Formation of the structural and functional organization of young stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of mixed artificial and natural origin in the conditions of berry pine forests of and forb pine forests of the Middle Urals 43
- Novikov A.I., Rebko S.V., Novikova T.P., Petrishchev E.P.** The effect of the individual seed mass of "Negorelskaya" variety Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on 30-day germination in 40-cell SideSlit growing containers 59

TECHNOLOGY.

MACHINERY AND EQUIPMENT

- Dornyak O.R., Markova L.V., Popikov S.K., Tanchuk P.V.** Static loading of the power hydraulic drive of the manipulator links of the timber transport machine in critical mode 87
- Zaikin A.N., Sivakov V.V., Novikova T.P., Zelikov V.A., Stasyuk V.V., Chuikov A.S.** Software for managing the system of maintenance and repair of forest machines: assessment of applicability 105
- Malyukov S.V., Lysych M.N., Bukhtoyarov L.D., Pozdnyakov E.V., Gnusov M.A., Shavkov M.V., Petkov A.F.** Analysis of disk working bodies of soil-cultivating implements 128
- Platonov A.A.** Integrated Forest Vegetation Management: Stages and Development Prospects 142

- Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Зеликов В.А., Колодий П.В.** Компьютерное моделирование рекуперативного кривошипного механизма поворота колонны манипулятора лесовозного автопоезда 158
- Сокол П.А., Божко А.В., Новикова Т.П., Ребко С.В.** Гидромеханические трансмиссии лесотранспортных машин: технологическая связь с воздействием на почвенно-растительную среду 179
- Razinkov E.M., Shamaev V.A., Kantieva E.V., Ishchenko T.L., Tomina E.V., Chuikov A.** Duration of drying the birch veneer in the plywood production 158
- Sokol P.A., Bozhko A.V., Novikova T.P., Rebko S.U.** Hydro-mechanical powertrain for timber transport vehicles: technological relationship with the impact on the soil and plant environment 179


Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/1>

УДК 630.389



Анализ факторов негативного воздействия лесозаготовительного производства на природную среду Северо-Западного региона РФ

Елена О. Графова ✉, grafova.elena.karelia@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0003-0263-9345>

Владимир С. Сюнёв, siounev@petrsu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>

Вячеслав В. Горбач, gorbach@psu.karelia.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2326-8539>

¹ ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185035, Российская Федерация

Лесосечные работы и транспортировка древесины оказывают негативное воздействие на природные и природно-антропогенные объекты окружающей среды. Учет, оценка и прогнозирование видов негативного воздействия позволит рационально планировать технологические операции лесозаготовки. Данные о степени негативного воздействия позволят оценить суммарный урон объектам окружающей среды и с учетом нагрузок конкретного вида работ предусмотреть комплекс защитных мер, адекватный соответствующей степени воздействия. Степень воздействия на окружающую среду видов лесозаготовительной деятельности определяли с помощью метода экспертных оценок. Изменчивость характера и значимости техногенного воздействия от рубок и вывозки древесины исследовали методом главных компонент. Обобщенный перечень видов негативного воздействия ранжируется в сторону снижения степени следующим образом: загрязнение водного стока и почв утечками ГСМ, изменение биоразнообразия, повреждение древостоев, уничтожение и загрязнение почв, загрязнение воздуха химическими примесями, сбросы сточных вод в водные объекты, свалка бытовых отходов и сброс стоков в почву. Повышенное внимание при оценке биоразнообразия следует уделить организации бытовых и вспомогательных технологических процессов. Они характеризуются средними нагрузками, вызывая загрязнение воды и почвы бытовыми и промышленными стоками, образование свалок бытовых и производственных отходов. Строительство лесных дорог и работы по заправке, ремонту и обслуживанию лесозаготовительной техники в мастерских участках и пунктах заправки ГСМ способствуют проявлению нетипичных воздействий в виде загрязнения воды и почвы нефтепродуктами. Полученное теоретическое обоснование необходимо дополнять актуальными данными натурных исследований по выявленным видам негативных воздействий. На основании прогнозных значений степени негативного воздействия на окружающую среду авторами разрабатывается комплекс научно-обоснованных технических и технологических решений, повышающих экологическую безопасность при выполнении лесозаготовительных работ.

Ключевые слова: лесозаготовка, негативное воздействие, окружающая среда, загрязнение, воздействие горюче-смазочных материалов, бытовые стоки, свалки, древесные отходы, экологическая безопасность

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: Графова Е. О. Анализ факторов негативного воздействия лесозаготовительного производства на природную среду Северо-Западного региона РФ / Е. О. Графова, В. С. Сюнёв, В. В. Горбач // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 5–24. – Библиогр.: с. 16–23 (48 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/1>.


Поступила 26.04.2023. Пересмотрена 16.05.2023. Принята 17.05.2023. Опубликована онлайн 18.09.2023.

Review

The negative impact factor analysis to the environment from logging production on the North-West region of Russian Federation

Elena O. Grafova ✉, grafova.elena.karelia@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0003-0263-9345>

Vladimir S. Syunev, siounev@petsu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2558-2671>

Viacheslav V. Gorbach, gorbach@psu.karelia.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2326-8539>

¹ *Petrozavodsk State University, Lenin Ave., 33, Petrozavodsk, 185035, Russian Federation*

Abstract

Logging operations and timber transportation have a negative impact to natural and natural-anthropogenic environmental objects. Accounting, evaluation and forecasting of negative impact types will allow rational planning of technological logging operations. The negative impact degree data will allow assessing the total damage to environmental objects and, taking into account the loads of a particular work types provide for a set of protective measures adequate to the corresponding impact degree. The impact degree of types of logging activities to the environment was determined using the method of expert assessments. The variability of the nature and significance of the technogenic impact from logging and removal of wood was studied by the method of principal components. The generalized list of types of negative impact is ranked in the direction of decreasing degree as follows: pollution of water runoff and soils by leaks of fuels and lubricants, changes in biodiversity, damage to forest stands, destruction and pollution of soils, air pollution with chemical impurities, wastewater discharges into water bodies, landfill of domestic waste and discharge of effluents into the soil. When assessing biodiversity, increased attention should be paid to the organization of household and auxiliary technological processes. They are characterized by medium loads, causing pollution of water and soil by domestic and industrial effluents, and the formation of landfills for domestic and industrial waste. The construction of forest roads and work on refueling, repair and maintenance of logging equipment in workshops and fuel filling stations contribute to the manifestation of atypical impacts in the form of water and soil pollution with oil products. The obtained theoretical substantiation must be supplemented with relevant data from field studies on the identified types of negative impacts. Based on the predicted values of the degree of negative impact on the environment, the authors develop a set of scientifically substantiated technical and technological solutions that increase environmental safety during logging operations.

Keywords: *logging, negative impact, pollution, environment, exposure to fuels and lubricants, household wastewater, landfills, wood waste, environmental safety.*

Funding: this research 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: Grafova E. O., Syunев V. S., Gorbach V. V. (2023) The negative impact factor analysis to the environment from logging production in the North-West region of the Russian Federation. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 5–24 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/1>.

Received 26.04.2023. *Revised* 16.05.2023. *Accepted* 17.05.2023. *Published online* 18.09.2023.

Введение

Лесозаготовительное производство по своему назначению оказывает негативное воздействие на целостность и состояние лесных экосистем. Каждый технологический этап лесозаготовок приносит негативное воздействие на объекты окружающей среды, ухудшая их исходное состояние. Особенно чувствительно такое воздействие для северных и арктических территорий, отличающихся ранимостью и медленным восстановлением растительности [11]. В отечественной и зарубежной научной литературе учеными наиболее часто исследуются некоторые аспекты негативного воздействия процесса лесозаготовки на лесную среду, а именно: в результате движения лесозаготовительной техники довольно часто возникают повреждения древостоев, под тяжестью колесных и гусеничных машин возникает деформация и нарушение почвы и почвенного покрова, происходят повреждения корневых систем деревьев и кустарников, образуются неиспользуемые древесные отходы и т.д. Тем не менее, мониторинг экологических нарушений, возникающих при реализации лесозаготовительной деятельности, позволил выявить дополнительные виды не учитываемых ранее воздействий, отрицательно сказывающихся на состоянии лесной природной среды, а именно: загрязнение лесных площадок хранения и обслуживания техники, придорожных лесных территорий остатками топлива, масел и прочих нефтесодержащих веществ; многолетние накопления отходов переработки древесины вблизи лесных предприятий; несанкционированные свалки у территорий лесных поселков и пр. Таким образом, целью настоящей работы является составление наиболее полного перечня видов негативных воздействий на объекты окружающей среды, возникающих в результате выполнения различных видов лесозаготовительных

работ, и оценка степени и значимости этих воздействий.

Негативное воздействие на окружающую среду начинается с подготовительных работ и продолжается при выполнении основных лесосечных работ. При этом вспомогательные работы, необходимые для содержания транспортного парка и рабочего персонала, также вносят свой вклад в техногенную нагрузку на лесную среду [9, 40, 44, 48]. Общая оценка складывается из подробного описания всех негативных воздействий, возникающих при выполнении каждого вида работ:

1. Строительство лесных дорог.

Данный этап подготовительных работ реализуется при всех видах лесопользования. Строительство лесных дорог осуществляется непосредственно лесозаготовительными или субподрядными организациями дорожного строительства. Наибольшее влияние на окружающую среду оказывают технологические процессы строительства [21]. При строительстве лесных дорог проводится первичная подготовка – расчистка полосы отвода. Необходимым организационным мероприятием является организация отвода воды с участка: строительство придорожных канав и дренажных систем. Наиболее часто в литературе упоминаются следующие виды негативного воздействия: механические воздействия в виде шума и вибрации, загрязнение воздуха выхлопными газами, серьезные нарушения целостности почв, накопление древесных отходов и образование свалок, повреждение древостоев и подраста, гидрологические изменения, приводящие к осушению или заболачиванию территорий [42]. Так, А.Ю. Мануковским и коллегами проводилась оценка временных и периодических воздействий лесозаготовительных процессов на окружающую среду и здоровье человека [22]. Выделена группа негативных воздействий, которая включает шум, пыль, транспортные выбросы. Отработавшие газы

ДВС и топливные испарения отмечены авторами как наиболее распространенные источники газопылевого загрязнения. Эффективным способом снижения данных видов воздействий является использование гибридных двигателей, оснащение выхлопных систем воздушными фильтрами, а также значительный эффект окажет применение экологически чистого топлива, защитной шумоизоляции экранами. Отмечаются научные работы по влиянию механического повреждения корней деревьев и почв [12, 15, 46]. Анализ нормативных документов показывает, что на сегодняшний день в лесном законодательстве России до сих пор не отрегулированы вопросы строительства, содержания дорог: лесные дороги не всегда отражены на планах, отсутствует четкий регламент соблюдения экологических мероприятий при строительстве и эксплуатации лесных дорог. Основные принципы экологической безопасности лесных дорог должны закладываться уже на стадии проектирования, реализовываться при эксплуатации с учетом выявленных негативных аспектов. Выявляемые в процессе эксплуатации нарушения должны устраняться сразу или на стадии рекультивации. Таким образом, негативное влияние на окружающую среду возникает как при строительстве, так и при эксплуатации лесных дорог.

2. Лесосечные работы и транспортировка древесины.

Выполнение основных работ, таких как лесозаготовка и транспортирование древесины, наносит наибольший ущерб лесным экосистемам [24, 44, 45]. Заготовка древесины является самым распространенным видом использования лесов. Лесопользование должно осуществляться в строгом соответствии с принципами, изложенными в Лесном кодексе [19], а именно: 1) обеспечивать сохранение биологического разнообразия, средообразующих, водоохраных, защитных и иных полезных функций лесов; 2) учитывать длительность выращивания лесов, возможность их воспроизводства, улучшение их качества и продуктивности; 3) использовать леса способами, не наносящими вреда лесной среде и здоровью человека. Лесозаготовки, как

правило, проводятся на основании аренды лесов сроком до 49 лет. Около 85 % леса заготавливается методом сплошных механизированных рубок. Механизированная база постоянно совершенствуется новыми моделями лесозаготовительной техники [2, 4, 33]. Экологическим последствиям применения лесной техники посвящено множество работ [11, 10]. Также необходимо учитывать проблемы, связанные с образованием лесосечных отходов [20, 26]. Как правило, в состав образующихся отходов входит: гнилая, низкокачественная, горелая древесина, древесная зелень, корни, пни, ветви, общий объем которых может достигать 37 %. Необходимость утилизации лесосечных отходов способствовала разработке соответствующих технологических решений и конструкций [1]. Функционирование транспорта леса, его влияние на окружающую среду рассмотрено во многих работах [3, 7, 8, 16, 35] и также оценивается как негативное. Стоит отметить случаи, когда в результате ошибок операторов нарушается герметичность системы высокого давления лесозаготовительной техники и происходит разлив технологических жидкостей. При этом ориентировочные объемы потерь могут составлять от 10 до 300 литров, в зависимости от типа используемой техники. И такие утечки оказываются значительными. Решая проблему воздействия лесной техники на почвы и древостой, российские ученые разработали рекомендации по усовершенствованию конструкций лесных машин, ограничению веса трелевочных машин, рассчитали допустимые глубины колеи [13, 48]. Многие авторы отмечают в своих работах необходимость комплексной оценки воздействий, которые оказывает на экологическое состояние придорожной полосы дорожно-транспортной комплекс, для возможности дальнейшего управления качеством окружающей среды [34]. Таким образом, очевидно, что значительное воздействие на лесные экосистемы оказывают лесосечные работы и транспортировка древесины, которые составляют большую часть основных лесозаготовительных работ.

3. Деревообработка и глубокая переработка древесины.

Деревообработка осуществляется на верхних складах или обрабатывающих предприятиях. Выполнение данного вида работ связано с проблемой образования и накопления древесных отходов. В случае глубокой переработки древесины – с образованием сопутствующих химических выбросов и сбросов загрязняющих веществ. Довольно часто лесозаготовка и деревообработка реализуются на одном предприятии [41]. Одним из направлений минимизации образования отходов является повышение эффективности освоения биомассы древесины и применение малоотходных технологических процессов [29]. Другим направлением повышения эффективности лесопользования является использование отходов в технологических процессах лесозаготовок [36, 28]. Первичная обработка древесины закачается в лесопилении и механической обработке и предполагает образование таких видов отходов: горбыль, рейки, кора, опилки, стружка, а также щепы, кусковые отходы [5, 27]. Применение отходов в качестве вторичных ресурсов рассматривается в работе [39] и внедряется повсеместно на большинстве лесопромышленных предприятий, но процент невостребованных отходов все еще достаточно высок. Часто не используемые повторно отходы складываются рядом с лесопромышленными предприятиями. В результате повсеместно по России, и Северо-Западу в частности, увеличиваются площади, занятые свалками древесных отходов. Количество таких несанкционированных свалок также растет, они попадают в списки приоритетных экологических проблем некоторых регионов, а их ликвидация требует значительных средств. Длительное пребывание древесных отходов на одной территории способствует изменению физического и химического состояния накопленной массы, ухудшению качества окружающей среды, санитарной и пожароопасной обстановки [25]. Таким образом, при выполнении работ по деревообработке и глубокой переработке древесины возникают такие негативные явления, как образование древесных отходов, химических загрязнений воздуха, почвы, воды.

Установлено, что ряд важных вопросов, связанных с влиянием на лесную среду вспомогательных работ, сопутствующих лесозаготовительному производству, реализуемых на инфраструктурных объектах, таких как мастерские и ремонтно-заправочные участки, пункты хранения и заправки топливом, содержание рабочих, задействованных в лесозаготовительных работах, изучены незначительно, редко оцениваются.

4. Вспомогательные работы, связанные с заправкой техники и хранением топлива и технологических жидкостей.

Мастерские, ремонтные участки являются неотъемлемой частью обеспечения функционирования лесозаготовительного процесса. Эксплуатация лесной техники в тяжелых природно-производственных условиях часто связана с поломками и авариями. Их своевременное устранение проводится в ремонтно-механических мастерских, что позволяет повысить эффективность лесозаготовок, обеспечить содержание парка лесозаготовительной техники в рабочем состоянии и технической готовности, своевременно снабжать технику топливом и технологическими жидкостями. Мастерские участки и пункты ремонтного обслуживания с оборудованием для устранения отказов первой и второй групп сложности размещаются рядом с участком лесозаготовок, чтобы не нарушать план заготовок за счет сокращения времени на ремонт техники. Во время проведения ремонтно-эксплуатационных работ, при нахождении техники на открытых площадках, возможно смывание остатков горюче-смазочных материалов в грунт. Остатки нефтепродуктов могут смываться, аккумулироваться в снегу в холодное время года и после таяния выноситься тальными водами. Возможными пунктами возникновения загрязнений также являются стоянки и заправки, не оборудованные крышей, и склады ГСМ. После прекращения использования складов горюче-смазочных материалов и заправочных пунктов в большинстве случаев на их месте обнаруживается значительное загрязнение почв и гибель растительности, соизмеримое или превышающее механическое воздействие самих

машин. Исследовано, что единичные случайные случаи разливов нефтесодержащих жидкостей в почву образуют пятно неглубокого проникновения до уровня подземных вод, которые могут оказаться легко переработанными в естественных условиях, но при систематическом поступлении загрязнений в одно и то же место область загрязнения расширяется в разные стороны, достигая подземных вод, и способна мигрировать на большие расстояния [31]. Нефтепродукты способны ухудшить агрофизические и агрохимические свойства почв. Нефтепродукты становятся ингибиторами почвенной биологической активности. При этом меняется численность и состав групп микроорганизмов, окислительно-восстановительная активность. Также меняется число пребывающих в почвах патогенных и токсичных видов микроскопических грибов [43, 47]. В результате образования устойчивого загрязнения нефтепродуктами почва становится субстратом для углеводородокисляющих микроорганизмов. Активно развиваясь, они угнетают другие микроорганизмы, а также растения и животных. Существует мнение, что пятна нефтепродуктов в жаркое время года становятся причиной возникновения лесных пожаров [30]. Таким образом, меняя свойства почвы и почвенной биоты, нефтепродукты представляют опасность для лесных территорий, а их поступление должно быть прекращено посредством своевременного удаления разливов или локализации источников загрязнения.

Помимо почв, происходит загрязнение лесных ручьев, протоков, канав, рек, озер и болот. Большинство авторов подтверждают, что особую опасность для экосистем представляет длительное воздействие нефтемаслопродуктов [18]. Поступление их в воду приводит к их частичному разбавлению и растворению с образованием эмульсионной пленки на поверхности, которую можно удалить. В случае сброса тяжелых фракций они оседают на дно, и их удаление становится проблематичным. Нефтяные загрязнения способны рассеваться, расширяться нефтяными пятнами, проникать в подземные воды и мигрировать на значительные расстояния, зависящие от типа водного объекта.

В подземных водах процессы разложения затормаживаются, снижая возможность самоочищения [17]. Таким образом, очевидно, что воздействие нефтепродуктов вызывает множество негативных изменений в природной среде. Снизить негативные явления необходимо внедрением новых технологических решений по локализации и очистке участков, подверженных наиболее частому загрязнению.

5. Функционирование лесных поселков связано с проживанием рабочих в период лесозаготовки. Строительство лесных поселков сопутствует лесозаготовительным работам и организуется в непосредственной близости от места заготовки. Рабочие, задействованные в лесозаготовительном процессе, должны обеспечиваться необходимыми условиями для проживания и питания. Эксплуатируются лесные поселки обычно несколько десятилетий, поэтому они должны быть снабжены инженерными коммуникациями, эксплуатироваться в соответствии с новыми изменениями в законодательстве Российской Федерации. В настоящее время стационарные лесные поселки возводятся редко. Предпочтение отдается мобильным формам проживания и питания. Чаще всего используются передвижные некапитальные разборные жилищные комплексы и столовые, которые должны обеспечиваться соответствующими инженерными коммуникациями [32]. Многолетняя недобросовестная эксплуатация таких объектов приводит к негативным последствиям: образованию свалок бытовых отходов вблизи мест проживания или непосредственно на лесных участках, сбросам хозяйственно-бытовых стоков от жилых и административных зданий и пр. Длительное пребывание отходов в свалочных массивах способствует разложению органической составляющей и выделению токсичных жидкостей – фильтратов, а также испарению биогазов и продуктов разложения и гниения. Химический состав образующихся растворов содержит высокие концентрации загрязняющих веществ, таких как аммиак, азотная и фосфорная группы, хром, никель, медь, цинк, ртуть и другие токсиканты, превышающие нормативное содержание в почвах и водах природных объектов. Также разложение органики до воды и углекислого газа способствует выщелачиванию металлов из соединений

свалочной массы, что приводит к их последующей миграции в почвы, грунтовые, поверхностные, дождевые и талые воды. Чаще всего в местах локализации свалок резко ухудшается санитарно-биологическая обстановка: интенсивно развиваются патогенные микроорганизмы и вирусы, образуется специфическая гельминтофауна. Все это приводит к развитию разнообразных древесных болезней, распространяющихся на значительные территории, уменьшая полезные лесные площади. Образованные свалки становятся объектами накопленного экологического ущерба и нуждаются в ликвидации источников загрязнения путем рекультивации. В настоящее время существует острая необходимость в разработке щадящих методов восстановления нарушенных территорий [23]. Неразрешенной задачей остаются многолетние неконтролируемые сбросы бытовых стоков и выгребов рабочих поселков. Накапливаясь, стоки проникают в почвы, поверхностные и грунтовые воды, ухудшая их состояние, вызывая нарушение почвенно-растительного покрова, заражение патогенными микроорганизмами, эвтрофикацию водоемов.

Многие авторы работали над созданием классификации антропогенных факторов влияния на объекты окружающей среды [37]. Классический перечень, предложенный И.П. Лаптевым, включает механические, физические, химические, биологические и ландшафтные объекты и используется многими учеными [14]. Довольно широкий спектр экологических проблем представлен в работе [20], в которой рассматриваются негативные воздействия на 9 объектов окружающей среды: атмосферные, биотические, водные, геолого-морфологические, ландшафтные, микроклиматические, криогенные, пирогенные, почвенные. Анализ литературных источников и законодательной базы в области лесопользования и охраны окружающей среды позволяет сформировать наиболее полный перечень видов негативного воздействия на объекты окружающей среды, возникающие в результате выполнения различных видов лесозаготовительных работ, и оценить степень и значимости этого воздействия.

Материалы и методы

Предмет и объект исследований – негативное воздействие на объекты окружающей среды, возникающее в результате выполнения лесозаготовительных работ. Рассмотрены следующие виды лесозаготовительных работ и их сокращенные обозначения: СтрДор – строительство лесных дорог; ЛесРаб – лесосечные работы; Трансп – транспортировка древесины; ДерОбр – обработка и глубокая переработка древесины; ГСМ – ремонт лесной техники в мастерских участках, заправка автотехники, организация пунктов заправки и снабжения ГСМ; Быт – содержание рабочих в вахтовых и лесных посёлках. Перечень выявленных видов негативного воздействия объединен в систему классификации (табл. 1).

Сбор данных

Для обзора отечественной литературы формировался запрос в системе Elibrary по ключевым фразам, обозначенным в 1 и 2 графах (табл. 1) применительно к рассматриваемым видам лесозаготовительных работ. Для обзора зарубежной литературы формировался запрос в поисковой системе Scopus в соответствии с переведенными на английский язык ключевыми фразами, обозначенными в 1 и 2 графах (табл. 1). Отбирались наиболее релевантные публикации, в которых были упомянуты виды негативного воздействия, относящиеся к рассматриваемым лесозаготовительным работам.

Критерием оценки степени негативного воздействия выбрана шкала желательности Харрингтона [38]. При оценке степени воздействия приняты обратные значения шкалы Харрингтона: с увеличением негативного воздействия увеличивается значение показателя (табл. 2). Показатели степени воздействия оценены экспертным путем.

Анализ данных

Данные обрабатывались в среде MS Excel и R 4.1.0 [R Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R version 4.0.1. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2020. URL: <http://www.r-project.org/> (дата обращения: 06.03.2023)] с использованием базовых функций. Направления изменчивости характера и силы воздействия на среду рассматриваемых видов деятельности исследовались методом главных компонент [6].

Таблица 1

Классификация видов негативного воздействия

Table 1

Classification of negative impact types

Объекты среды | Environmental objects	Виды негативных воздействий | Types of negative impacts	Обозначение вида воздействия | Designation of the impact types
Атмосферные | Atmospheric	Загрязнение выбросами транспорта /ЛМЗ | Transport Emission Pollution /LMZ	A1 | A1
	Загрязнение механическими примесями | Pollution with mechanical impurities	A2 | A2
	Загрязнение химическими примесями | Pollution by chemical impurities	A3 | A3
Механические | Mechanical	Шум, вибрация | Noise, vibration	M | M
Почвенные | Soil	Уничтожение покрова | Destruction of the cover	П1 | P1
	Уничтожение почв | Soil destruction	П2 | P2
	Свалка древесных отходов | Wood waste dump	П3 | P3
	Загрязнение ГСМ | Fuel pollution	П4 | P4
	Свалка бытовых отходов | Domestic waste dump	П5 | P5
	Загрязнение бытовыми стоками | Pollution from domestic sewage	П6 | P6
Биотические | Biotic	Механические повреждения древостоев | Mechanical damage to forest stands	Б1 | B1
	Повреждение подроста | Undergrowth damage	Б2 | B2
	Изменение биоразнообразия | Biodiversity change	Б3 | B3
Водные | Aquatic	Изменение гидрологического режима | Changing hydrological regime	В1 | W1
	Загрязнение водных объектов утечками ГСМ | Pollution of water bodies with fuel leaks	В2 | W2
	Загрязнение бытовыми стоками | Pollution from domestic sewage	В3 | W3

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 2

Шкала оценки степени негативного воздействия на окружающую среду

Table 2

The negative impact assessing scale to the environment

№ пп	Характеристика безразмерной шкалы желательности | Characterization of the dimensionless desirability scale	Отметки на шкале желательности Харрингтона | Marks on the Harrington Desirability Scale	Принятая характеристика степени негативного воздействия на окружающую среду | Accepted characteristic of the degree of negative impact on the environment
1	Очень хорошо | Very good	1,00 – 0,80	Очень сильное влияние | Very strong influence
2	Хорошо | Fine	0,80 – 0,63	Сильное влияние | Strong influence
3	Удовлетворительно | Satisfactorily	0,63 – 0,37	Среднее влияние | Medium impact
4	Плохо | Badly	0,37 – 0,20	Слабое влияние | Weak influence
5	Очень плохо | Very bad	0,20 – 0,00	Очень слабое или отсутствие влияния | Very weak or no impact

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Assessment of the degree of negative impact of logging activities

Вид воздействия | Type of impact	Виды работ | Types of work					
	СтрДор | StrDor	ЛесРаб | LesRab	Трансп | Transp	ДерОбр | DerObr	ГСМ | GSM	Быт | Byt
A1 | A1	0,5	0,55	0,5	0,63	0,59	0,61
A2 | A2	0,4	0,6	0,63	0,51	0,61	0,45
A3 | A3	0,6	0,6	0,55	0,25	0,25	0,41
M | M	0,63	0,62	0,62	0,55	0,61	0,53
П1 | P1	0,32	0,25	0,4	0,63	0,35	0,5
П2 | P2	0,27	0,21	0,35	0,63	0,27	0,56
П3 | P3	0,66	0,5	0,63	0,23	0	0,61
П4 | P4	0,22	0,3	0,53	0,17	0,12	0,6
П5 | P5	0,6	0,6	0,62	0,34	0,33	0,35
П6 | P6	0,6	0,57	0	0,33	0,45	0,33
Б1 | B1	0,4	0,3	0,5	0	0,59	0,58
Б2 | B2	0,6	0,28	0,58	0	0,63	0,52
Б3 | B3	0,25	0,55	0,8	0,25	0,23	0,53
В1 | W1	0,3	0,3	0,63	0,63	0,61	0,6
В2 | W2	0,3	0,33	0,57	0,42	0,15	0,28
В3 | W3	0,63	0,63	0	0,3	0,42	0,32

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Массив исходных данных представляет собой матрицу из n объектов – видов воздействия на среду, каждый из которых охарактеризован m признаками – видами деятельности (табл. 3). На ее основе рассчитана матрица корреляций признаков, которая послужила основой для итерационных процедур.

Используемый алгоритм позволяет вместо многочисленных исходных признаков рассчитать несколько линейных индексов – главных компонент, в которых «концентрируется» основная доля информации о различиях объектов. Главные компоненты отображают общие причины, в силу которых группы признаков изменяются согласованно, а группы объектов оказываются сходными. Информативность компонент выражают долями общей дисперсии. Сопряженную изменчивость признаков оценивают по факторным нагрузкам. Чем больше абсолютное значение факторной нагрузки у признака, значит, тем больше его влияние, знаки «+» или «-» указывают на прямую или обратную связь между признаками. Используя факторные нагрузки

в качестве коэффициентов пропорциональности, вычисляют значения главных компонент – координаты объектов в многомерном пространстве. Характер отличия объектов раскрывает их взаимное расположение на плоскости главных компонент.

Результаты и обсуждение

Результаты компонентного анализа указывают основные направления изменчивости воздействия на среду различных видов деятельности (табл. 4).

Три первые компоненты, учитывающие 86 % общей дисперсии, отражают самые существенные отличия по видам воздействия.

Ординация видов воздействий и направления изменчивости, определяемые рассматриваемыми видами работ, проведена в осях трех главных компонент (рис. 1). Первая, наиболее информативная компонента, оценивает вклад в общую изменчивость лесосечных работ и транспортировки древесины. Основные виды воздействия – уничтожение почв (П2), механические повреждения древостоев (Б2), уничтожение покрова (П1), изменение гидро-

логического режима (В1) и повреждение подроста (Б2) – получили здесь максимальные значения. Вместе с тем, еще три вида деятельности имеют относительно высокие факторные нагрузки. Это строительство лесных дорог, по воздействию на среду тяготеющее к обозначенной плеяде лесосечных работ и транспортировки древесины, и противостоящие им по характеру воздействия – деревообработка и функционирование вахтовых поселков. В последнем случае наиболее сильно проявляется загрязнение воды и почвы бытовыми стоками (В3 и П6).

Вторая главная компонента обозначила виды деятельности, связанные с загрязнением воды и почвы горюче-смазочными материалами (В2 и П4) и, как следствие, весомым изменением биоразнообразия (Б3), возникающим при вспомогательных работах в мастерских участках, хранении и заправке топливом, которые вместе со строительством лесных дорог составляют одну плеяду признаков.

Вместе с тем, строительство лесных дорог, судя по близким величинам факторных нагрузок в первой и второй компонентах, по характеру воздействия на среду занимает промежуточное положение между лесосечными работами и транспортировкой древесины, с одной стороны, и мастерскими участками, хранением топлива и пунктами заправки, с другой.

Таблица 4
Сопряженная изменчивость воздействия на среду различных видов деятельности (результаты компонентного анализа)

Table 4
Associated variability of environmental impact of various activities (results of component analysis)

Факторные нагрузки | Factor loads	Главные компоненты | Main components		
	ГК-1 GK-1	ГК-2 GK-2	ГК-3 GK-3
СтрДор | StrDor	0,405	0,466	-0,234
ЛесРаб | LesRab	0,534	0,119	0,237
Трансп | Transp	0,502	-0,014	-0,036
ДерОбр | DerObr	-0,370	0,365	-0,662
ГСМ | GSM	0,033	0,723	0,140
Быт | Vut	-0,401	0,335	0,656
Дисперсия	2,710	1,719	0,747
Дисперсия, %	45,2	28,7	12,4
Кумулята, %	45,2	73,8	86,3

Примечание: полужирным шрифтом указаны плеяды факторных нагрузок

Note: bold font indicates the pleiades of factor loadings

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

И наконец, третья компонента учитывает частные различия между рабочими вахтовыми поселками и деревообработкой. Наиболее существенными видами воздействий в первом случае являются механические повреждения подроста и древостоев (Б2 и Б1), в дополнение к загрязнению воды и почвы бытовыми стоками (В3 и П6), а также свалке бытовых отходов (П5), во втором наиболее весомы свалка древесных отходов (П3) и загрязнение почв горюче-смазочными материалами (П4).

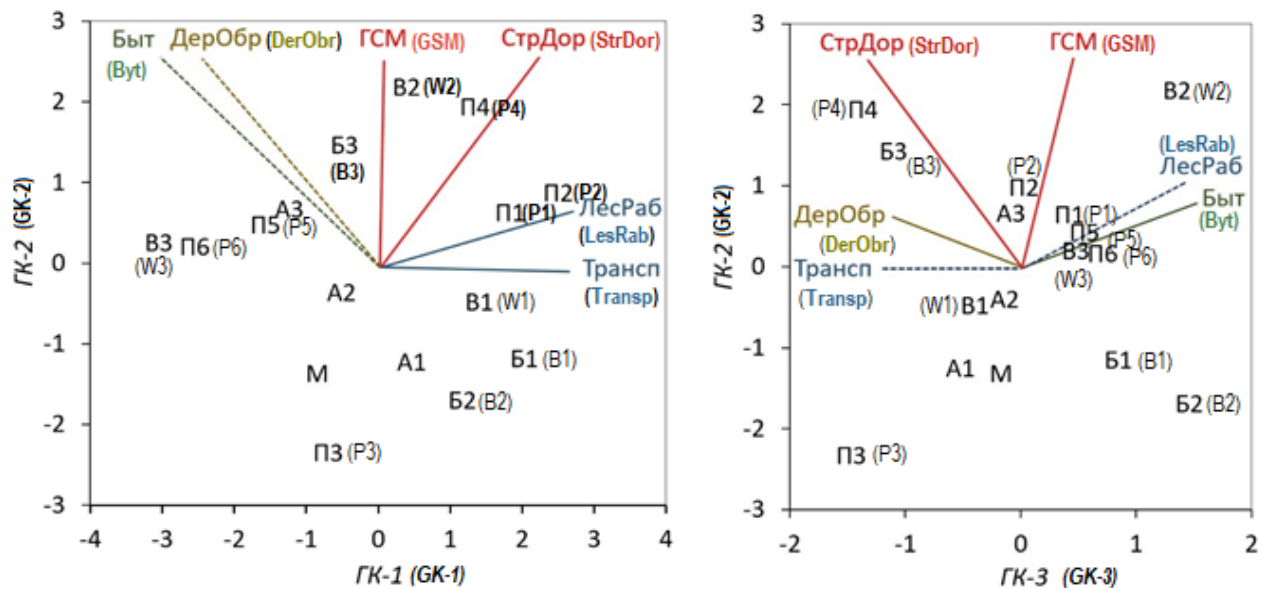


Рисунок 1. Ординация видов воздействий и направления изменчивости: цветом обозначена принадлежность работ к плеядам факторных нагрузок; сплошные линии – направления изменчивости видов воздействий при выполнении видов работ; пунктирные линии – виды работ, не принадлежащие к плеядам факторных нагрузок по соответствующим главным компонентам

Figure 1. Ordination of types of impacts and directions of variability: the color indicates that the work belongs to the pleiades of factor loads, the solid lines indicate the directions of variability of the types of impacts when performing the specified types of work, the dotted lines are the types of work that do not belong to the pleiades of factor loads for the corresponding main components

Источник: собственная композиция автор(ов)

Source: author's composition

Заключение

Разработанный перечень включает наиболее полное описание видов негативного воздействия на природные и природно-антропогенные объекты окружающей среды, включает оценку степени негативного воздействия и позволяет учесть техногенные нагрузки при планировании лесозаготовительной деятельности. Рассматриваемые виды работ по наиболее сильным факторным нагрузкам группируются в три направления деятельности:

1. Первое направление – лесосечные работы и транспортировка древесины, при выполнении которых возникают наиболее значимые виды негативного воздействия, такие как уничтожение почв, повреждение древостоев, покрова, подроста.

2. Второе направление – деревообработка и глубокая переработка древесины, а также мероприятия по содержанию рабочего персонала на время выполнения лесозаготовительных работ, характер-

ризуются средними нагрузками на окружающую среду, в частности вызывая загрязнения воды и почвы бытовыми и промышленными стоками, образованием свалок бытовых и производственных отходов.

3. Третье направление – строительство лесных дорог и вспомогательные работы по ремонту и обслуживанию лесозаготовительной техники в мастерских участках и пунктах заправки ГСМ, которые способствуют наиболее сильному проявлению загрязнения почвы и воды нефтепродуктами и, как следствие, изменению биоразнообразия в зоне воздействия.

Таким образом, имея прогнозные значения степени негативного воздействия на объекты окружающей среды, авторами разрабатывается комплекс научно-обоснованных мероприятий, повышающих экологическую безопасность выполнения лесозаготовительных работ, которые могут быть учтены при планировании будущих работ.

Список литературы

1. Андреев, А. А. Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья / А. А. Андреев // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты*. – 2014. – № 10. – С. 148–155. – EDN RWTMHN. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21237911>.
2. Бартенев, И. М. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения / И. М. Бартенев, М. В. Драпалюк // *Лесотехнический журнал*. – 2012. – № 1 (5). – С. 61–66. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=oxdpch&ysclid=lgw611th44619076442>.
3. Бурмистрова, О. Н. Оптимизация параметров транспортных процессов на предприятиях лесопромышленного комплекса / О. Н. Бурмистрова, С. И. Сушков, Ю. Н. Пильник // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 11. – С. 237–241. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24840083&ysclid=lgw6vj7tqu623568860>.
4. Воскобойников, И. В. Обоснование выбора системы гусеничных лесозаготовительных машин для совершенствования технологических процессов лесосечных работ / И. В. Воскобойников, Д. В. Кондратюк // *Технология колесных и гусеничных машин*. – 2015. – № 5. – С. 55–64. – EDN UUXFGF. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=uuxfgf>.
5. Рециклинг отходов: актуальность возрастает / И. Р. Шегельман, А. С. Васильев, П. О. Щукин, О. Н. Галактионов, Ю. В. Суханов // *Инженерный вестник Дона*. – 2014. – № 3 (30). – С. 28. – EDN TFXFDT. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22843875>.
6. Горбач, В. В. Практическое введение в среду R / В. В. Горбач // *Принципы экологии*. – 2021. – № 2 (40). – С. 120–122. – EDN GENAUQ. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50083854>.
7. Григорьев, И. В. Современный программный комплекс для повышения безопасности, надёжности и энергоэффективности автолесовозов / И. В. Григорьев, М. В. Зорин // *Вестник АГАТУ*. – 2021. – № 4 (4). – С. 65–72. – EDN IXJGVL. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47403282&ysclid=lhdkwg0utz816575962>.
8. Расчет показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелевке пачки хлыстов / И. В. Григорьев, В. А. Макуев, В. Я. Шапиро [и др.] // *Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник*. – 2013. – № 2. – С. 112–118. – EDN PXQDRP. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18901479>.
9. Оценка природных условий и хозяйственной деятельности человека в районе предполагаемого строительства лесовозной автомобильной дороги / В. А. Зеликов, П. В. Тихомиров, В. В. Никитин [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10. – № 1 (37). – С. 193–202. – EDN YVQEUZ. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/24>.
10. Казаков, И. В. Становление и развитие механизации лесохозяйственных работ / И. В. Казаков, С. А. Родин, В. И. Казаков // *Лесохозяйственная информация*. – 2019. – № 3. – С. 109–115. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.09. – EDN ICZXQU. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39263398>.
11. Математическое моделирование процесса динамического взаимодействия лесных машин и трелевочных систем с почвогрунтом при работе на склонах / В. А. Каляшов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2022. – Т. 12. – № 1 (45). – С. 82–95. – EDN IZAYPW. – DOI <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/7>.
12. Карпечко, А. Ю. Влияние разных технологий лесосечных работ на плотность почвы и массу корней / А. Ю. Карпечко // *Сибирский лесной журнал*. – 2019. – № 5. – С. 37–42. – EDN MQRXCF. – DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20190505>.
13. Влияние форвардеров на лесные почво-грунты / В. К. Катаров, В. С. Сюнев, Е. И. Ратькова, Ю. Ю. Герасимов // *Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ*. – 2012. – Т. 9, № 2. – С. 73–81. – EDN QIZMFN. – URL: <https://elibrary.ru/qizmf>.
14. Карташев, А. Г. Биоиндикация экологического состояния среды / А. Г. Карташев. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2013. – 58 с. – EDN XVBZPV. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35362879>.

15. Метод оценки эффективности лесовосстановительных мероприятий с учетом параметров лесотранспортной сети / Р. Н. Ковалев, И. М. Еналеева-Бандура, А. Н. Баранов [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 4 (56). – С. 64–71. – EDN ALCFHH. – DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-4-64-71>.

16. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом влияния климата и погоды на условия движения / В. Г. Козлов [и др.]. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2019. – 336 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37351322&ysclid=lhdafokgeg882408902>.

17. Кочетова, Ж. Ю. Экомониторинг нефти и нефтепродуктов в объектах окружающей среды / Ж. Ю. Кочетова. – Воронеж, 2016. – 204 с. – ISBN 978-5-91972-180-2. – EDN VVFLOQ. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37028727>.

18. Литвинова, Т. А. Современные способы обезвреживания и утилизации нефтесодержащих отходов для ликвидации загрязнения окружающей среды / Т. А. Литвинова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 123. – С. 902–916. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27509803&ysclid=lgw9fjfh 8833669654>.

19. Мартынюк, А. А. О концептуальных подходах к новой редакции Лесного кодекса Российской Федерации / А. А. Мартынюк // Лесохозяйственная информация. – 2020. – № 2. – С. 5–24. – DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.2.01. – EDN XMECZB. – URL: <https://elibrary.ru/xmeczb>.

20. Майорова, Л. П. Воздействие лесозаготовок на окружающую среду / Л. П. Майорова, П. Б. Рябухин // Вестник Красноярского государственного аграрного университета – 2012. – №. 8. – С. 73–77. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18201095&ysclid=lgw9g8me19539452471>.

21. Макарова, Ю. А. Рациональное использование природных ресурсов при реконструкции и строительстве лесовозных автомобильных дорог / Ю. А. Макарова, А. Ю. Мануковский // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – Т. 5. – № 5 (31). – С. 454–458. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32614795&ysclid=lgw9iwh1rf603741565>.

22. Мануковский, А. Ю. Воздействие лесовозных автомобильных дорог на экологию / А. Ю. Мануковский, Е. А. Кожанова, Д. А. Востриков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6. – № 7 (43). – С. 305–309. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36745495&ysclid=lgw9k4ra79239889996>.

23. Оценка уровня негативного воздействия на компоненты природной среды несанкционированной свалки у п. Самофаловка Волгоградской области / О. А. Мишустин, С. Б. Хантимирова, В. Ф. Желтобрюхов [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 9. – С. 50. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=gdpxqx&ysclid=lgwacf38qq463716777>.

24. Морозова, Е. В. Учет затрат и обязательств по охране, защите и воспроизводству лесов в лесозаготовках / Е. В. Морозова // Международный бухгалтерский учет. – 2014. – № 8 (302). – С. 8–20. – EDN RUXPMH. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21153762>.

25. Мохирев, А. П. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования / А. П. Мохирев, Ю. А. Безруких, С. О. Медведев // Инженерный вестник Дона – Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета. – № 2 (часть 2). – 2015. – 13 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24132495&ysclid=lgwa9k1x8n199517546>.

26. Мохирев, А. П. Технология лесосечных работ с сортировкой порубочных остатков древесины / А. П. Мохирев, М. А. Зырянов // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 3 (27). – С. 118–122. – EDN UKWGNN. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24258836>.

27. Перспективы комплексного использования отходов лесозаготовительного производства / О. В. Мурашова, Н. С. Главатских, П. Н. Перфильев, Н. О. Задраускайте // Лесной вестник. – 2022. – Т. 26, № 4. – С. 119–127. – EDN MBJQDK. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-4-119-127>.
28. Пискунов, М. А. Моделирование расположения лесосечных отходов при использовании технологий заготовки древесины с обрезкой сучьев у пня / М. А. Пискунов, Л. В. Щеголева, И. П. Матвеев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2018. – № 2 (38). – С. 61–73. – EDN UUTVXU. – DOI: <https://doi.org/10.15350/2306-2827.2018.2.61>.
29. Полянин, И. А. Технология сортировки щепы по смолистости, полученной из пней и некондиционной древесины / И. А. Полянин [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6. – С. 937–941. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21611517&ysclid=lgwae0ke3p137282748>.
30. Аспекты возникновения и технологии тушения широкомасштабных лесных пожаров / В. В. Протасов, В. М. Попов, В. В. Юшин, М. А. Рыжова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – № 1. – С. 199–201. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21030452&ysclid=lgwahi014o691815670>.
31. Путилина, В. С. Трансформация нефти и нефтепродуктов в почвах, горных породах, подземных водах. Загрязнение, инфильтрация, миграция, деградация. Метаболиты / В. С. Путилина, И. В. Галицкая, Т. И. Юганова // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. – 2019. – № 108. – С. 1–112. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39278738&ysclid=lgwaii56x3625079857>.
32. Ранникко, П. Койвусельга. Социальная трансформация лесозаготовительного поселка в российской Карелии (перевод с фин. яз. Ю. М. Килин) / П. Ранникко, Э. Варис, М. Пииппонен // *Studia Humanitatis Borealis*. – 2016. – № 2 (7). – С. 32–47. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30739861&ysclid=lhdbdp3lfv631942743>.
33. Модернизация валочно-сучкорезно-раскряжевочного механизма лесного харвестера / К. П. Рукомойников, Е. М. Царев, С. Е. Анисимов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 3 (387). – С. 130–138. – EDN DOQYXO. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-130-138>.
34. Рыбакова, Н. А. Влияние автотранспортного загрязнения на рост лесных культур лиственницы европейской / Н. А. Рыбакова, Ю. Б. Глазунов // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10. – № 2 (38). – С. 70–80. – EDN PLEKMX. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/7>.
35. Рябухин, П. Б. Экологические аспекты при эксплуатации лесозаготовительных машин / П. Б. Рябухин // Леса России и хозяйство в них. – 2016. – № 3 (58). – С. 68–71. – EDN XQURDP. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28094637&ysclid=lhdf4c34mh515887215>.
36. Сергиенко, А. В. Необходимость рационального использования отходов деревообработки / А. В. Сергиенко, И. В. Яцун // Наука и образование сегодня. – 2017. – № 1 (12). – С. 12–13. – EDN XHQESB. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27675487>.
37. Сюнёв, В. С. Новые технические решения по снижению негативного воздействия лесопромышленных производств на лесную среду / Е. О. Графова, В. С. Сюнёв // *Resources and Technology*. – Петрозаводск, 2022. – Вып. 19. – № 2. – С. 48–71. – DOI: <http://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6543>.
38. Федорченко, С. Г. Интегральная мера оценки состояния энергетической безопасности / С. Г. Федорченко, Г. С. Федорченко // *Problemele Energeticii Regionale*. – 2014. – Т. 24. – № 1. – С. 1–16. – URL: <https://elibrary.ru/sgynxf>.
39. Особенности опилок как наполнителя при производстве материалов из древесных отходов / М. В. Филичкина, В. В. Абрамов, Д. С. Самошин, Г. А. Фролов // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 2 (10). – С. 26–30. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20788305>.

40. Цыпук, А. М. Перспективная технология лесовосстановления в условиях интенсивного лесопользования / А. М. Цыпук, А. В. Родионов // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2020. – № 58. – С. 128–131. – EDN FPDDOY. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44172915>.
41. Шадрин, А. А. Система машин для переработки низкокачественной и тонкомерной древесины в условиях лесозаготовительных предприятий / А. А. Шадрин, А. С. Гурба, Э. Ю. Семенкина // Современные проблемы теории машин. – 2019. – № 7. – С. 15–18. – DOI: <https://doi.org/10.26160/2307-342X-2019-7-15-18>.
42. Häggström C., Lindroos O. Human, technology, organization and environment – a human factors perspective on performance in forest harvesting // *International Journal of Forest Engineering*. – 2016. – № 2 (27). – P. 67–78. – DOI: <http://doi.org/10.1080/14942119.2016.1170495>.
43. Goma-Tchimbakala, E. J. C. D.; Pietrini, I.; Goma-Tchimbakala, J.; Corgnati, S. P. Use of Shotgun Metagenomics to Assess the Microbial Diversity and Hydrocarbons Degrading Functions of Auto-Mechanic Workshops Soils Polluted with Gasoline and Diesel Fuel. *Microorganisms*. – 2023; 11(3): 722. – DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030722>.
44. Kelly M. C., Germain R. H., Bick S. Impacts of Forestry Best Management Practices on Logging Costs and Productivity in the Northeastern USA // *Journal of Forestry*. – 2017. – № 6 (115). – P. 503–512. – DOI: <http://doi.org/10.5849/JOF.2016-031R1>.
45. Klaes B. [et al.]. Middle-term effects after timber harvesting with heavy machinery on a fine-textured forest soil // *European Journal of Forest Research*. – 2016. – № 6 (135). – P. 1083–1095. – DOI: <http://doi.org/10.1007/s10342-016-0995-2>.
46. Sustainable forest management a global review / Dh. Kumar, C. L. Thakur, D. R. Bhardwaj, N. Sharma, H. Sharma, P. Sharma // *Int. J. Curr. Microbiol.* – 2021. – App. Sci. – V. 10. – DOI: <http://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1001.292>.
47. Ning, Z.; Zhang, M.; He, Z.; Cai, P.; Guo, C.; Wang, P. Spatial Pattern of Bacterial Community Diversity Formed in Different Groundwater Field Corresponding to Electron Donors and Acceptors Distributions at a Petroleum-Contaminated Site. *Water*. – 2018; 10(7): 842. – P. 15. – DOI: <https://doi.org/10.3390/w10070842>.
48. Rozītis G., Zimelis A., Lazdiņš A. Evaluation of productivity and impact on soil of tracked ProSilva F2/2 forwarder in forest thinning // *Forestry and wood processing*. – 2017. – № 1. – P. 94–100. – DOI: <http://doi.org/10.22616/rrd.23.2017.014>.

References

1. Andreev A. A. Resursosberezhenie i ispol'zovanie othodov zagotovki i pererabotki drevesnogo syr'ya [Resource saving and use of waste materials for harvesting and processing of wood raw materials] *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty = Fundamental and applied research: problems and results*. 2014; 10: 148–155. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21237911> (in Russ.).
2. Bertenev I.M., Drapalyuk M.V. Snizhenie vrednogo vozdejstviya lesnyh traktorov i lesosechnyh mashin na pochvu i nasazhdeniya [Reducing the harmful effects of forest tractors and logging machines on the soil and plantings] *Lesotekhnicheskij zhurnal = Lesotechnical journal*. 2012; 1(5): 61–66. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=oxdpch&ysclid=lgw611th44619076442> (in Russ.).
3. Burmistrova O. N., Sushkov S. I., Pil'nik YU. N. Optimizaciya parametrov transportnyh processov na predpriyatiyah lesopromyshlennogo kompleksa [Optimization of the parameters of transport processes at the enterprises of the timber industry complex], *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2015; 11: 237–241. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24840083&ysclid=lgw6vj7tqu623568860> (in Russ.).
4. Voskoboinikov I.V. Obosnovanie vybora sistemy gusenichnyh lesozagotovitel'nyh mashin dlya sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh processov lesosechnyh rabot [Justification of the choice of a system of tracked logging machines for improving the technological processes of logging operations] *Tekhnologiya kolesnyh i*

gusenichnyh mashin = Technology of wheeled and tracked machines. 2015; 5: 55-64. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=uuxfgf> (in Russ.).

5. Shegelman I. R., Vasilyev A. S., Shchukin P. O., Galaktionov O. N., Sukhanov Yu. V. Recikling othodov: aktual'nost' vozrastaet [Waste recycling: the relevance is increasing]. Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don. 2014; 3(30): 28. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22843875> (in Russ.).

6. Gorbach V. V. Prakticheskoe vvedenie v sredu R [Practical introduction to the R environment] Principy ekologii = Principles of ecology. 2021; 2 (40): 120–122. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50083854> (in Russ.).

7. Grigoriev I. V. Sovremennyj programmnyj kompleks dlya povysheniya bezopasnosti, nadyozhnosti i energoeffektivnosti avto-lesovozov [Modern software package for improving the safety, reliability and energy efficiency of timber trucks] Vestnik AGATU = Vestnik AGATU. 2021; 4(4): 65–72. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47403282&ysclid=lhdkwg0utz816575962> (in Russ.).

8. Grigoriev V. I., Grigoryev I. V., Makuev V. A., Shapiro V. Ya. [et al.] Raschet pokazatelej processa uplotneniya pochvogrunta pri trelevke pachki hlystov [Calculation of indicators of the process of soil compaction during skidding of a bundle of whips] Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa = Bulletin of the Moscow State University of Forests - Forest Bulletin. 2013; 2: 112–118. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18901479> (in Russ.).

9. Zelikov V. A., Tikhomirov P. V., Nikitin V. V. [et al.] Ocenka prirodnyh uslovij i hozyajstvennoj deyatel'nosti cheloveka v rajone predpolagaemogo stroitel'stva lesovoznoj avtomobil'noj dorogi [Assessment of natural conditions and human economic activity in the area of the proposed construction of a logging road] Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry magazine. 2020; 10, No. 1 (37): 193–202. URL: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/24> (in Russ.).

10. Kazakov I. V., Rodin S. A., Kazakov V. I. Stanovlenie i razvitie mekhanizacii lesohozyajstvennyh rabot [Formation and development of mechanization of forestry operations] Lesohozyajstvennaya informaciya = Forestry information. 2019; 3: 109 – 115. URL: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.09> (in Russ.).

11. Kalyashov V. A., Shapiro V. Ya., Grigoriev I. V. [et al.] Matematicheskoe modelirovanie processa dinamicheskogo vzaimodejstviya lesnyh mashin i trelevochnykh sistem s pochvogruntom pri rabote na sklonah [Mathematical modeling of the process of dynamic interaction of forest machines and skidding systems with soil when working on slopes] Lesotekhnicheskij zhurnal = Lesotechnical journal. 2022; 12, 1 (45): 82–95. URL: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/7> (in Russ.).

12. Karpechko A. Yu. Vliyanie raznykh tekhnologij lesosechnykh rabot na plotnost' pochvy i massu kornej [Influence of different logging technologies on soil density and root mass] Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Forest Journal. 2019; 5: 37–42. URL: <https://doi.org/10.15372/SJFS20190505> (in Russ.).

13. Katarov V. K. Vliyanie forvarderov na lesnye pochvo-grunty [Influence of forwarders on forest soils] Resources and Technology, Petrozavodsk, 2012; 2 (9): 73–81. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19420548&ysclid=lgw7trsq14585208743> (in Russ.).

14. Kartashev, A. G. Bioindikaciya ekologicheskogo sostoyaniya sredy [Bioindication of the ecological state of the environment] Tomskij gosudarstvennyj universitet sistem upravleniya i radioelektroniki Bioindikaciya ekologicheskogo sostoyaniya sredy = Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. 2012; 58 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35362879> (in Russ.).

15. Kovalev I. M., Enaleeva-Bandura I. M., Baranov A. N. [et al.] Metod ocenki effektivnosti lesovosstanovitel'nyh meropriyatij s uchetom parametrov lesotransportnoj seti [Method for evaluating the effectiveness of reforestation measures taking into account the parameters of the forest transport network] Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies. 2022; 4 (56): 64–71. URL: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-4-64-71> (in Russ.).

16. Kozlov V. G. [et al.] Metody, modeli i algoritmy proektirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog s uchetom vliyaniya klimata i pogody na usloviya dvizheniya [Methods, models and algorithms for designing logging

roads, taking into account the influence of climate and weather on traffic conditions]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2019; 336 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37351322&ysclid=lhdafokgeg882408902> (in Russ.).

17. Kochetova, Zh. Yu. Ekomonitring nefiti i nefteproduktov v ob"ektah okruzhayushchej sredy [Ecomonitoring of oil and oil products in environmental objects]. Voronezh: Federal State State Military Educational Institution of Higher Professional Education «Military Educational and Scientific Center of the Air Force» Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (Voronezh) of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2016; 204 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37028727> (in Russ.).

18. Litvinova, T. A. Sovremennye sposoby obezvrezhivaniya i utilizacii neftesoderzhashchih othodov dlya likvidacii zagryazneniya okruzhayushchej sredy [Modern methods of neutralization and disposal of oil-containing waste to eliminate environmental pollution] Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. 2016; 123: 902–916. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27509803&ysclid=lgw9fjfh8833669654> (in Russ.).

19. Martynyuk, A. A. On conceptual approaches to the new edition of the Forest Code of the Russian Federation. Forestry information. – 2020; 2: 5-24. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.2.01. EDN XMECZB. URL: <https://elibrary.ru/xmeczb>.

20. Majorova L. P., Ryabuhin P. B. Vozdejstvie lesozagotovok na okruzhayushchuyu sredu [The impact of logging on the environment] Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. 2012; 8: 73–77. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18201095&ysclid=lgw9g8mel9539452471> (in Russ.).

21. Makarova, YU. A., Manukovskij A. YU. Racional'noe ispol'zovanie prirodnyh resursov pri rekonstrukcii i stroitel'stve lesovoznyh avtomobil'nyh dorog [Rational use of natural resources in the reconstruction and construction of logging roads] Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika = Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2017; 5 (31): 454–458. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32614795&ysclid=lgw9iwh1rf603741565> (in Russ.).

22. Manukovskij A. YU., Kozhanova E. A., Vostrikov D. A. Vozdejstvie lesovoznyh avtomobil'nyh dorog na ekologiyu [Impact of logging roads on the environment] Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika = Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2018; 6, 7 (43): 305–309. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36745495&ysclid=lgw9k4ra79239889996> (in Russ.).

23. Mishustin, O. A., Hantimirova S. B., ZHeltobryuhov V. F. Ocenka urovnya negativnogo vozdejstviya na komponenty prirodnoj sredy nesankcionirovannoj svalki u p. Samofalovka Volgogradskoj oblasti [Evaluation of the level of negative impact on the components of the natural environment of an unauthorized dump near the village of Samofalovka, Volgograd Region] Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Bulletin of the Don. 2019, No. 9, 50 p. <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=gdpqxq&ysclid=lgwacf38qq463716777> (in Russ.).

24. Morozova, E. V. Uchet zatrat i obyazatel'stv po ohrane, zashchite i vosproizvodstvu lesov v lesozagotovkah [Accounting for costs and obligations for the protection, protection and reproduction of forests in logging] / E. V. Morozova // Mezhdunarodnyj buhgalterskij uchet = International Accounting. 2014; 8(302): 8–20. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21153762> (in Russ.).

25. Mohirev A. P., Bezrukih YU. A., Medvedev S. O. Pererabotka drevesnyh othodov predpriyatij lesopromyshennogo kompleksa, kak faktor ustojchivogo prirodoopol'zovaniya [Processing of wood waste from timber industry enterprises as a factor in sustainable nature management] Inzhenernyj vestnik Dona- Severo-Kavkazskij nauchnyj centr vysshej shkoly Yuzhnogo federal'nogo universiteta № 2 (chast' 2) = Engineering Bulletin of the Don - North Caucasian Scientific Center of the Higher School of the Southern Federal University. 2015; 2 (part 2): 13 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24132495&ysclid=lgwa9k1x8n199517546> (in Russ.).

26. Mokhirev, A. P., Zyryanov M. A. Tekhnologiya lesosechnyh rabot s sortirovkoj porubochnyh ostatkov drevesiny [Technology of logging operations with sorting of logging residues of wood] Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies], 2015, No. 3 (27), P. 118–122. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24258836> (in Russ.).
27. Murashova O. V., Glavatskikh N. S., Perfilyev P. N., Zadrauskaite N. O. Perspektivy kompleksnogo ispol'zovaniya othodov lesozagotovitel'nogo proizvodstva [Prospects for the integrated use of logging waste] Lesnoj vestnik = Forest Bulletin. 2022; V. 26, No. 4: 119–127. URL: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-4-119-127> (in Russ.).
28. Piskunov M. A., Shchegoleva L. V., Matveev I. P. Modelirovanie raspolozheniya lesosechnyh othodov pri ispol'zovanii tekhnologij zagotovki drevesiny s obrezkoj such'ev u pnya [Modeling the location of logging waste when using technologies for harvesting wood with pruning of branches at the stump] Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie = Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature management. 2018; 2 (38): 61–73. URL: <https://doi.org/10.15350/2306-2827.2018.2.61> (in Russ.).
29. Polyani I. A. Tekhnologiya sortirovki shchepy po smolistosti, poluchenoj iz pnevoj i nekondicionnoj drevesiny [Technology for sorting chips according to resin content obtained from stump and substandard wood] Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research. 2014; 6: 937–941. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21611517&ysclid=lgwae0ke3p137282748> (in Russ.).
30. Protasov V. V., Popov V. M., YUshin V. V., Ryzhova M. A. Aspekty vozniknoveniya i tekhnologii tusheniya shirokomasshtabnyh lesnyh pozharov [Aspects of emergence and extinguishing technology of large-scale forest fires] Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the South-Western State University. Series: Technics and technologies. 2013; 1: 199–201, URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21030452&ysclid=lgwahi014o691815670> (in Russ.).
31. Putilina, V. S., Galickaya I. V., YUganova T. I. Transformaciya nefi i nefteproduktov v pochvah, gornyh porodah, podzemnyh vodah. Zagryaznenie, infil'traciya, migraciya, degradaciya. Metabolity [Transformation of oil and oil products in soils, rocks, underground waters. Pollution, infiltration, migration, degradation. Metabolites] Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoj literatury = Ecology. A series of analytical reviews of world literature. 2019; 108: 1–112. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39278738&ysclid=lgwaii56x3625079857> (in Russ.).
32. Rannikko P., Varis E., Piipponen M. Social'naya transformaciya lesozagotovitel'nogo poselka v rossijskoj Karelii [Social transformation of a logging village in Russian Karelia] Studia Humanitatis Borealis, 2016; 2(7): 32–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30739861&ysclid=lhdbdp31fv631942743> (in Russ.).
33. Rumoynikov K.P., Tsarev E. M., Anisimov S. E. [et al.] Modernizaciya valочно-suchkorezno-raskryazhevochnogo mekhanizma lesnogo harvestera [Modernization of the felling-lopping-bucking mechanism of a forest harvester] Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of higher educational institutions. Forest magazine]. 2022; 3 (387): 130 – 138. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-130-138> (in Russ.).
34. Rybakova N. A., Glazunov Yu. B. Vliyanie avtotransportnogo zagryazneniya na rost lesnyh kul'tur listvennicy evropejskoj [Influence of road pollution on the growth of European larch forest cultures]. Lesotekhnicheskij zhurnal = [Forest engineering journal]. 2020; 10, 2 (38): 70–80. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/7> (in Russ.).
35. Ryabukhin P. B. Ekologicheskie aspekty pri ekspluatcii lesozagotovitel'nyh mashin [Ecological aspects in the operation of logging machines] Lesa Rossii i hozyajstvo v nih = Forests of Russia and the economy in them. 2016; 3 (58): 68–71. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28094637&ysclid=lhdf4c34mh515887215> (in Russ.).
36. Sergienko A. V., Yatsun I. V. Neobhodimost' racional'nogo ispol'zovaniya othodov derevoobrabotki [The need for rational use of woodworking waste] Nauka i obrazovanie segodnya = Science and education today. 2017; 1(12): 12–13. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27675487> (in Russ.).

37. Syunyov V. S., Grafova E. O. *Novye tekhnicheskie 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*, Petrozavodsk, 2022; 19, 2: 48-71. DOI: <http://doi.org/10.15393/j2.art.2022.6543> (in Russ.).
38. Fedorchenko S. G., Fedorchenko G. S. *Integral'naya mera ocenki sostoyaniya energeticheskoy bezopasnosti* [Integral measure for assessing the state of energy security] *Problemele Energeticii Regionale*. 2014;24,1: 1–16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21703784&ysclid=lgwaqzd2yz202553801> (in Russ.).
39. Filichkina M. V., Abramov V. V., Samoshin D. S., Frolov G. A. *Osobennosti opilok kak napolnitelya pri proizvodstve materialov iz drevesnyh othodov* [Features of sawdust as a filler in the production of materials from wood waste] *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2013; 2(10): 26–30. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20788305> (in Russ.).
40. Tsypuk A. M., Rodionov A. V. *Promising technology of reforestation under conditions of intensive forest management Actual problems of the forest complex*. 2020; 58: 128–131. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44172915> (in Russ.).
41. Shadrin A. A., Gurba A. S., Semenkina E. Yu. *Sistema mashin dlya pererabotki nizkokachestvennoj i tonkomernoj drevesiny v usloviyah lesozagotovitel'-nyh predpriyatij* [A system of machines for processing low-quality and small-sized wood in the conditions of logging enterprises] *Sovremennye problemy teorii mashin = Modern problems of machine theory*. 2019; 7: 15–18. DOI: <https://doi.org/10.26160/2307-342X-2019-7-15-18> (in Russ.).
42. Häggström C., Lindroos O. *Human, technology, organization and environment – a human factors perspective on performance in forest harvesting* // *International Journal of Forest Engineering*. 2016. – № 2 (27). – P. 67–78. – URL: <http://doi.org/10.1080/14942119.2016.1170495>.
43. Goma-Tchimbakala, E.J.C.D.; Pietrini, I.; Goma-Tchimbakala, J.; Corgnati, S.P. *Use of Shotgun Metagenomics to Assess the Microbial Diversity and Hydrocarbons Degrading Functions of Auto-Mechanic Workshops Soils Polluted with Gasoline and Diesel Fuel*. *Microorganisms*. – 2023, – №11(3): 722. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030722>.
44. Kelly M. C., Germain R. H., Bick S. *Impacts of Forestry Best Management Practices on Logging Costs and Productivity in the Northeastern USA* // *Journal of Forestry*. –2017.– № 6 (115). –P. 503–512. DOI: <http://doi.org/10.5849/JOF.2016-031R1>.
45. Klaes B. [et al.]. *Middle-term effects after timber harvesting with heavy machinery on a fine-textured forest soil* // *European Journal of Forest Research*. –2016.–№ 6 (135). –P. 1083–1095. – URL: <http://doi.org/10.1007/s10342-016-0995-2>.
46. Kumar Dh., *Sustainable forest management a global review* / Dh. Kumar, C. L. Thakur, D. R. Bhardwaj, N. Sharma, H. Sharma, P. Sharma // *Int. J. Curr. Microbiol.* 2021; App. Sci. 10. DOI: <http://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1001.292>.
47. Ning, Z.; Zhang, M.; He, Z.; Cai, P.; Guo, C.; Wang, P. *Spatial Pattern of Bacterial Community Diversity Formed in Different Groundwater Field Corresponding to Electron Donors and Acceptors Distributions at a Petroleum-Contaminated Site*. *Water*. 2018; 10 (7): 842, – P. 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10070842>.
48. Rozītis G., Zimelis A., Lazdiņš A. *Evaluation of productivity and impact on soil of tracked ProSilva F2/2 forwarder in forest thinning* // *Forestry and wood processing*. –2017. – № 1. –P. 94–100. – DOI: <http://doi.org/10.22616/rtd.23.2017.014>.

Сведения об авторах

✉ *Графова Елена Олеговна* – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185035, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0263-9345>, e-mail: grafova.elena.karelia@gmail.com.

Сюнёв Владимир Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры транспортных и технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185035, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2558-2671>, e-mail: siounev@petsu.ru.

Горбач Вячеслав Васильевич – доктор биологических наук, доцент кафедры зоологии и экологии, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», пр. Ленина, 33, г. Петрозаводск, 185035, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2326-8539>, e-mail: gorbach@petsu.ru.

Information about the authors

✉ *Elena O. Grafova* – Cand. Sci. (Technology), associate professor, Petrozavodsk State University, Lenin Ave., 33, Petrozavodsk city, 185035, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0263-9345>, e-mail: grafova.elena.karelia@gmail.com.

Vladimir S. Syunev – Dr. Sci. (Technology), professor, Department of Transport and Technological Machines and Equipment, Petrozavodsk State University, Lenin Ave., 33, Petrozavodsk city, 185035, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2558-2671>, e-mail: siounev@petsu.ru.

Viacheslav V. Gorbach – Dr. Sci. (Biology), associate professor, Department of zoology and ecology, Petrozavodsk State University, Lenin Ave., 33, Petrozavodsk city, 185035, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2326-8539>, e-mail: gorbach@petsu.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/2>

УДК 630*232.13+58.085+582.632.1



Фенотипическая и генетико-селекционная оценка березы повислой (*Betula pendula* ROTR) и березы пушистой (*Betula pubescens* EHRH.) *ex situ* и *in vitro*

Игорь Ю. Исаков¹ ✉, labgen@vglta.vrn.ru 0000-0003-2927-3275

Татьяна М. Табацкая², tatyana.tabacky@gmail.com 0000-0003-1104-4255

Наталья И. Внукова², natalya.vnuckova@yandex.ru 0000-0002-7807-4179

Ольга С. Машкина^{2,3}, mashkinaos@mail.ru 0000-0001-8252-2192

Вячеслав И. Михин¹, Dr.Mikhin@yandex.ru 0000-0002-7090-0800

Зоран Говедар⁴, zoran.govedar@sf.unibl.org orcid.org/0000-0001-9791-4113

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

²ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии», ул. Ломоносова, 105, Воронеж, 394087, Россия

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, 1, Воронеж, 394018, Россия

⁴Государственный Университет Баня Лука, Петра Бойовик, 1а, Баня Лука, Босния и Герцеговина

Результаты изучения испытательных культур берез, полученных разными способами опыления *ex situ* и введенных в культуру *in vitro*, представлены в настоящей статье. Для выявления фенотипических, культуральных и цитологических характеристик у двух видов берёз, естественно растущих в Центральном-Черноземном Регионе – березы повислой (диплоид) и березы пушистой (тетраплоид), – были специально созданы испытательные культуры семенного происхождения F₁ и F₂. В статье выявлены данные по фенотипической (росту в высоту в ювенильном и репродуктивном периодах онтогенеза), генетико-селекционной (система семенного размножения) изменчивости и некоторые характеристики введения в культуру *in vitro* семенного потомства F₁ селекционных форм местных видов берез. Для прогнозирования ростовых характеристик семенного потомства селекционных форм местных видов берез, полученных при разных способах опыления – самоопылении и свободном опылении в разные отрезки онтогенеза (в возрасте 2 и 10 лет), проведена статистическая обработка признака роста в высоту семей с использованием рангового коэффициента корреляции Спирмена ρ . Дана характеристика видовой специфики по реакции на разные способы опыления, морфогенной активности самофертильных и самостерильных форм березы повислой и березы пушистой на питательной среде $\frac{1}{2}$ МС + 6-бензиламинопурин 1 мг/л, первичного побегообразования эксплантов и регенерационной способности у этих видов, характера морфогенеза (формирование основного побега). Для полиплоидного вида (береза пушистая) установлен более высокий уровень самофертильности, а также более интенсивный рост побегов в высоту в условиях *in vitro*, чем для березы повислой; первичные экспланты у первой имели иной характер морфогенеза (наблюдалась совместная инициация основного побега с адвентивными), чем у березы повислой (формирование основного побега), что говорит о большем адаптивном потенциале для полиплоидных видов древесных пород и их больших возможностях для включения в генетико-селекционные эксперименты и получения ценных селекционных форм.

Ключевые слова: береза повислая, береза пушистая, самофертильность, самостерильность, ювенильный возраст, культура *in vitro*, полиплоидия, первичный эксплант, коэффициент мультипликации, метафазная пластинка

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

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Фенотипическая и генетико-селекционная оценка березы повислой и березы пушистой *ex situ* и *in vitro* / И. Ю. Исаков, Т. М. Табацкая, Н. И. Внукова, О. С. Машкина, В. И. Михин, З. Говедар // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 25–42. – Библиогр.: с. 38–41 (27 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/2>.


Поступила 24.03.2023. Пересмотрена 12.08.2023. Принята 13.08.2023. Опубликована онлайн 18.09.2023.


Article


Phenotypical and genetic breeding evaluation silver birch (*Betula pendula* ROTH) and downy birch (*Betula pubescens* Ehrh.) *ex situ* and *in vitro*


Igor Yu. Isakov¹ ✉, labgen@vglta.vrn.ru  0000-0003-2927-3275

Tatyana M. Tabatskaya², tatyana.tabacky@gmail.com  0000-0003-1104-4255

Natalya I. Vnukova², natalya.vnuckova@yandex.ru  0000-0002-7807-4179

Olga S. Mashkina^{2,3}, mashkinaos@mail.ru  0000-0001-8252-2192

Vyacheslav I. Mikhin¹, Dr.Mikhin@yandex.ru  0000-0002-7090-0800

Zoran Govedar⁴, zoran.govedar@sf.unibl.org  orcid.org/0000-0001-9791-4113

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

²All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Lomonosov str., 105, Voronezh city, 394087, Russian Federation

³Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh city, 394018, Russian Federation

⁴State University in Banja Luka, Petra Bojovik 1A, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina

Abstract

The results of a study of birch test cultures obtained by different methods of *ex situ* pollination and introduced into culture *in vitro* are presented. To identify the phenotypic, cultural and cytological characteristics of two birch species naturally growing in the Central Black Earth Region - silver birch (diploid) and downy birch (tetraploid), test cultures of seed origin F₁ and F₂ were specially created. The article presents data on phenotypic (growth in height in the juvenile and reproductive periods of ontogeny), genetic selection (seed propagation system) variability and some characteristics of the introduction of F₁ seed progeny of breeding forms of local birch species into *in vitro* culture. To predict the growth characteristics of seed progeny of breeding forms of local birch species obtained by different methods of pollination - self-pollination and open pollination at different stages of ontogeny (at the age of 2 and 10 years), a statistical processing of the feature of growth in height of families was carried out using the rank Spearman's correlation coefficient ρ . Species specificity was shown in response to different pollination methods, morphogenic activity of self-

fertile and self-sterile forms of these birch species on a nutrient medium $\frac{1}{2}$ MC + 6-benzylaminopurine 1 mg/l, primary shoot formation of explants and regenerative capacity in these species, the nature of morphogenesis (formation of the main escape). For the polyploid species (downy birch), a higher level of self-fertility was established, as well as a more intensive growth of shoots in height than for drooping birch; primary explants in the former had a different character of morphogenesis (there was a joint initiation of the main shoot with adventitious ones) than in silver birch (formation of the main shoot), which indicates a greater adaptive potential for polyploid species and their greater opportunities for inclusion in genetic breeding experiments and obtaining valuable breeding forms.

Keywords: *Betula pendula* Roth., *Betula pubescens* Ehrh., self-fertility, self-sterility, juvenile age, in vitro culture, polyploidy, primary explant, multiplication factor, metaphase plate

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

Acknowledgements: the authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of the article.

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

For citation: 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, No. 2 (50), pp. 25-42 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/2>.

Received 24.03.2023. **Revised** 12.08.2023. **Accepted** 13.08.2023. **Published online** 18.09.2023.

Введение

Древесные растения являются важным экологическим ресурсом планеты, так как сохраняют до 80 % наземного видового биоразнообразия [FAO и ЮНЕП. Состояние лесов мира, 2020]. Деревья из рода Берёза широко используются как древесное топливо и древесный уголь, в домостроении, фармацевтике и других целях [FAO Global wood production growth accelerates, 2017;1]. Поэтому актуальным является расширение знаний о полиморфизме естественных популяций древесных пород, его потенциале, особенностях регенерации.

Берёза является одной из лесообразующих и хозяйственно-ценных пород России. Род *Betula* L. относится к перекрестноопыляющимся (аллогамным) видам. Известно, что многообразие форм в пределах вида обусловлено именно прогрессивным влиянием аутбридинга¹ [2].

В роде *Betula* L. количество видов значительно варьирует, от 35 до 140 [3, 4, 5, 6]. Очевидно, это связано с тем, что среди видов берёз широко распространена естественная гибридизация, которая приводит к фенотипическому разнообразию и способности к образованию алло- и аутополиплоидов в этом роде. Большое внимание в последние годы уделяется возможности интрогрессивной гибридизации у берёзы, которая может привести к расширению генетической изменчивости и является основой для успешной адаптации видов к неблагоприятным условиям окружающей среды. Так, полагают, что значительная фенотипическая и генотипическая изменчивость тетраплоидной берёзы пушистой в Ирландии и Исландии связана с потоком генов от диплоидной карликовой берёзы (*B. nana* L.) посредством интрогрессивной гибридизации, что подтверждено на морфологическом, хромосомном и молекулярном уровнях [7, 8].

Виды этого рода образуют полиплоидный ряд – диплоиды ($2n=28$), триплоиды ($2n=42$), тетра-

¹ Дарвин, Ч. Действие перекрестного опыления и самоопыления в растительном мире. М.-Л.: ОГИЗ-Сельхозгиз. 1939. 340 с.

плоиды ($2n=56$), пентаплоиды ($2n=70$), гексаплоиды ($2n=84$) и октаплоиды ($2n=112$). Береза повислая является диплоидным видом, а береза пушистая, приспособленная к более суровым условиям местобитания (произрастает в северной части лесостепи, менее требовательна к свету, более влаголюбива, переносит суровые зимы), – тетраплоидным видом [9]. Оба вида являются видами-пионерами, быстро заселяющими освободившиеся земли (т.е. относительно устойчивыми к внешним факторам среды). Однако в последние годы с увеличением числа засух в европейской части России в защитных полосах, состоящих из березы повислой, наблюдается усыхание значительного количества деревьев этой породы [10]. Затенённость в жаркое время является достаточно значимым фактором, наряду с влагообеспеченностью препятствующим усыханию деревьев. В этой связи очень важно использовать для дерева максимально возможное время нахождения в тени в период воздушной/почвенной засухи. Это обстоятельство может обеспечить нахождение деревьев в группе по отношению к движению солнца в дневное время. Показано, что одной из причин этого явления также считается географическая направленность таких полос по сторонам света [11].

В европейской части РФ наиболее часто встречаются береза повислая (*Betula pendula* Roth) и береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.). В Центральной лесостепи на долю березы повислой приходится около 2 % общей площади лесных культур (третье место после культур сосны и дуба) [12], она занимает около 13 % общей площади защитных насаждений [13]. Показано, что местные виды берез обладают рядом особенностей, благоприятствующих их вовлечению в селекционный процесс [14]. К их числу относятся: быстрый рост в высоту; ежегодное (обильное) плодоношение; раннее (на 5-7-й год) вступление в репродуктивную стадию онтогенеза и, следовательно, небольшой временной период между смежными генерациями; потенциальная способность к разным способам опыления (аут-, кросс- и инбридингу); скрещиваемость при межвидовой и внутривидовой гибридизации и др.

В ВГЛТУ созданы испытательные культуры семенного происхождения двух местных видов берез F_1 и I_1 ; F_2 и I_2 (частично) – б. повислой и б. пушистой, а также получены рецiproкные гибриды между ними и интродуцированными видами. Важным при этом является проведение генетико-селекционных исследований для изучения их природы и выявления наиболее устойчивых (к засухе и другим стрессирующим факторам) и продуктивных генотипов березы.

Большие перспективы сохранения (консервации *ex situ*) и воспроизводства представителей ценного генофонда лесных древесных растений открывает использование в программах по селекции биотехнологических методов (технологий культуры *in vitro*) [15]. Одним из приоритетных направлений лесной биотехнологии является создание биокolleкций *in vitro*, основанных на хранении живых образцов (клеток, тканей, органов, микрорастений) элитных растений в строго контролируемых асептических условиях с помощью различных методов и подходов [16, 17]. Такие биокolleкции *in vitro* являются не только стратегическим резервом элитного лесного генофонда (в том числе березы), но и основой для эффективного выращивания посадочного материала ценных генотипов и создания лесных культур целевого назначения. Созданная в ВНИИЛГИСбиотех коллекция *in vitro* включает более 70 клонов (в виде микрорастений) ценных генотипов березы, тополя, осины и ивы [18, 19]. Среди них – клоны и гибриды березы повислой и березы пушистой селекции Исакова И.Ю. и Козьмина А.В. Длительность хранения образцов – 6 лет. В 2018 г. коллекция была зарегистрирована на сайте «Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации» (<http://ckp-rf.ru/usu/569228/>). Одним из условий целесообразности и эффективности подобных биологических систем является их стабильность (морфометрическая, генетическая, хромосомная). В значительной степени указанное условие выполняется с помощью периодического биотестирования коллекционных образцов.

Цель настоящего исследования – сравнительная оценка генетических, селекционных и ростовых характеристик двух разноплоидных местных видов берез (березы повислой и березы пуши-

стой) в условиях *ex situ* (испытательные культуры) и *in vitro* (коллекционные клоны).

В задачи работы входило:

1. Определение рангового коэффициента вариации у семей б. повислой и б. пушистой, полученных при разных способах опыления (в возрасте 2 и 10 лет).

2. Биотехнологическая оценка влияния условий хранения коллекционных клонов березы в культуре *in vitro* на жизнеспособность, сохранность адаптивного и регенерационного потенциалов.

3. Оценка статуса пloidности коллекционных клонов.

Материалы и методы

Испытательные культуры двух местных видов берез – березы повислой и березы пушистой и гибридов – созданы посадочным материалом, полученным разными типами скрещивания. В качестве исходных объектов были использованы деревья из автохтонных популяций берёзы повислой (обозначение в дальнейшем С – суходол) и берёзы пушистой (болото – Б). Растительный материал (F₁) получен путем скрещивания (самоопыления) материнских деревьев березы повислой (61 дерево) и б. пушистой (36 деревьев) в Воронежском государственном природном биосферном заповеднике им. В.М. Пескова в 1981 году сотрудниками лаборатории селекции НИИ ЦНИИЛГиС ВНПО «Союзлесселекция» д.б.н. Ю.Н. Исаковым и к.с.-х.н. В.В. Иевлевым по общепринятой методике [Пятницкий, 1961]. В том же году зрелые семена от самоопыления и свободного опыления указанных деревьев, а также гибридные (с б. карельской, б. бумажной, б. вишневой, б. белокитайской, б. маньчжурской и межвидовые гибриды местных видов) были высеяны в посевном отделении Ступинского стационара. Общее количество деревьев F₁ – 1570. В возрасте 2 лет они были пересажены на лесокультурную площадь в борозды по схеме 3 × 1. В проанализированных семьях (9 – б. повислая, 13 – б. пушистая) количество деревьев в выборке варьировало от 6 до 25.

Для грамотного ведения лесного хозяйства актуальным является выяснение возможности ранней диагностики роста деревьев в высоту, когда по

росту в молодом возрасте можно предсказать рост в более старшем возрасте. В этой связи был проведен сравнительный анализ хода роста некоторых семей березы повислой и пушистой, полученных при разных способах опыления (само- и свободном опылении), в двух- и десятилетнем возрасте. Двухлетние растения были ранжированы по росту, затем были определены значения высот у семей аналогичного происхождения и вычислен коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ между ростом в двух- и десятилетнем возрасте. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена позволяет определить, существует ли между двумя переменными зависимость, выражаемая монотонной функцией (то есть при росте одной переменной увеличивается и вторая, и наоборот) [20].

Материалом для биотехнологических исследований (*in vitro*) служили микрорастения 8 клонов березы из коллекции *in vitro*: березы пушистой (клоны 1пш (Б-12 со), 2пш (Б-12 св), 3пш (Б-12 со), 6пш (гибрид х б. белокитайская), 7 гб (гибрид х б. белокитайская)) и березы повислой (д.1, д.5, ПВ1). Коллекционные клоны получены от взрослых (35-45 лет) исходных деревьев селекции Исакова И.Ю., Козьмина А.В.

Экспланты взрослых деревьев (одноузловые стеблевые сегменты) были однократно введены в культуру *in vitro*, из них регенерированы микрорастения по разработанной нами методике [18, 19] с использованием безгормональной питательной среды Мурасиге и Скуга [21] с половинным содержанием макросолей (½ МС). Коллекционные клоны поддерживали *in vitro* двумя способами: 1) в стандартных условиях культивирования (при температуре 25±2 °С, фотопериоде 16 ч день / 8 ч ночь, освещенности 2.0 клк) путем редкого (один раз в 3-5 месяцев) микрочеренкования микрорастений и 2) при пониженной положительной температуре (4±1 °С), слабой освещенности (0.5 клк), коротком фотопериоде (6 ч день / 18 ч ночь) [18]. Культуральные сосуды – биологические пробирки объемом 50 мл и колбы объемом 250 мл. Эксперименты осуществляли в трех повторностях по 30 культур (микропобегов) для каждого клона.

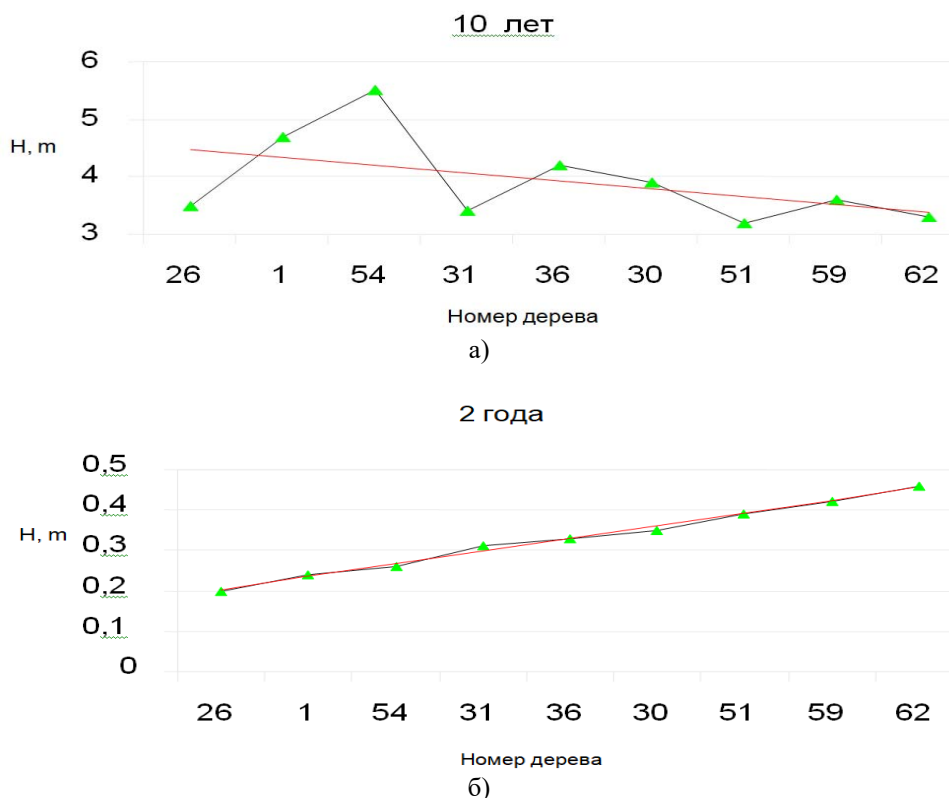
Эффективность хранения культур оценивали по основным биотехнологическим параметрам: росту и жизнеспособности культур, сохранности их регенерационного и адаптивного потенциалов к условиям культивирования. Оценку соматической изменчивости проводили по морфологическим признакам (хлороз, аномалии развития, некрозы и др.).

Определение пloidности (числа хромосом) коллекционных клонов проводили в меристеме кончиков корешков микрорастений. Материал фиксировали в спиртово-уксусной смеси (3:1) с предварительной обработкой 0,002 молярным раствором 8-оксихинолина при температуре 10-14 °С в течение 3 часов. Давленные препараты, окрашенные ацетогематоксилином, изготавливали по методике [22] в нашей модификации. В каждом образце анализировали не менее 20-30 метафазных пластинок. Просмотр микропрепаратов осуществляли на световом микроскопе AXIO Lab. A1 (CarlZeiss Microscopy GmbH) с использованием объектива 40× и 100×. Микрофото съемку осуществляли с помощью цифровой камеры AxioCam ICc 1.

Результаты и обсуждение

Генетико-селекционная оценка испытательных культур березы (*ex situ*)

Общим для двух изученных видов (б. повислой и б. пушистой) является то, что они имеют одинаковую структуру выборок первой генерации семенного потомства по отношению к инбридингу в возрасте 10 лет. Кроме того, при самоопылении величина коэффициента изменчивости (C_v) у семей, полученных при самоопылении, варьировала в более широких пределах (4-39 % у б. пушистой и 13-46 % у б. повислой), чем при свободном опылении (соответственно, 8-25 % и 4-31 %). В то же время между ростом семенного потомства в двух- и десятилетнем возрасте у этих видов при разных способах опыления выявлена неоднозначная связь. У березы повислой в десятилетнем возрасте рост инбредного потомства не отличался существенно от контроля, за исключением семьи № 54, где рост особей от самоопыления превышал контроль на 27 %. У этого вида и инбредное (рис. 1, а, б), и аутбредное (рис. 1, в, г) потомство показало явно выраженную отрицательную связь (соответственно, $\rho = -0.45$ и $\rho = -0.37$).



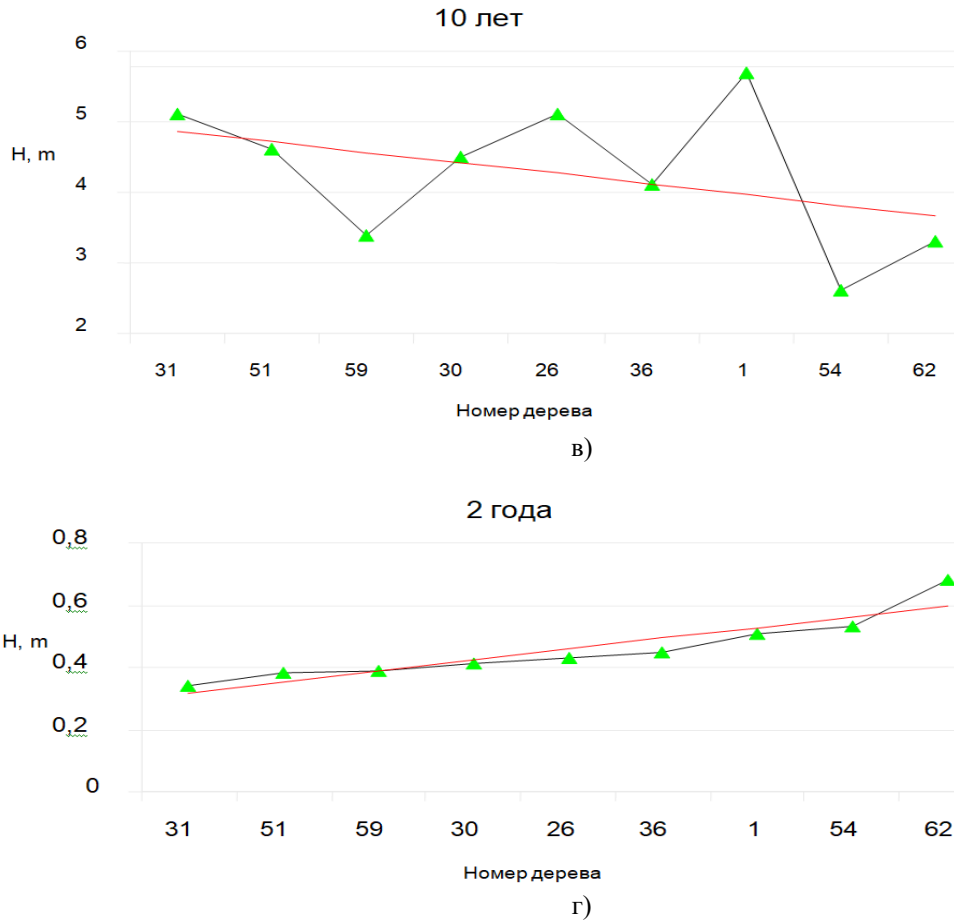
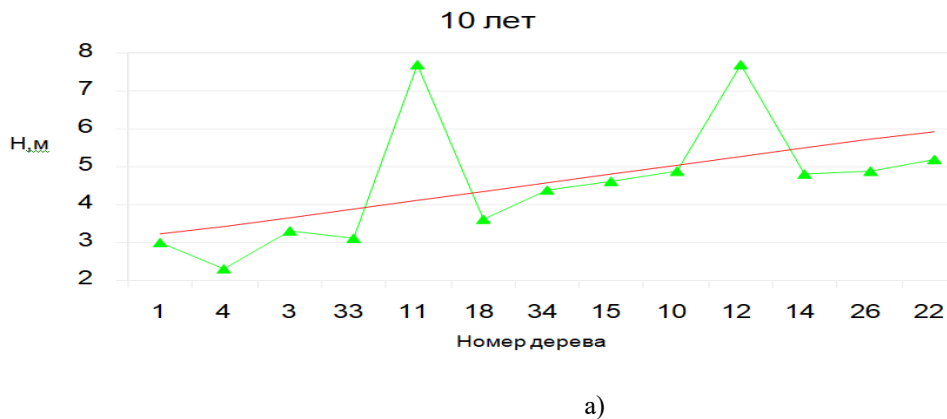


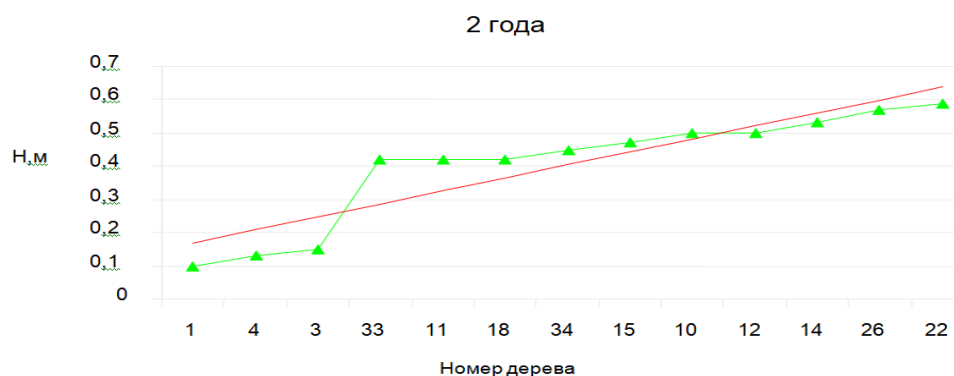
Рисунок 1. Динамика роста и степень подобия у семенного потомства б. повислой в двух- и десятилетнем возрасте, а) и б) – самоопыление, $\rho = -0.45$; в) и г) – свободное опыление, $\rho = -0.37$

Figure 1. Dynamics of growth and degree of similarity in seed progeny of silver birch at two and ten years of age, а) and б) – self-pollination, $\rho = -0.45$; в) and г) – open pollination, $\rho = -0.37$

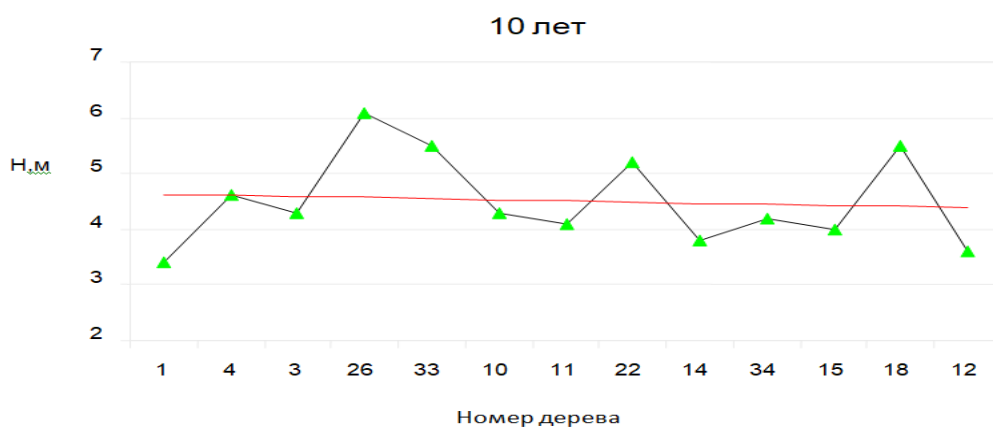
Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

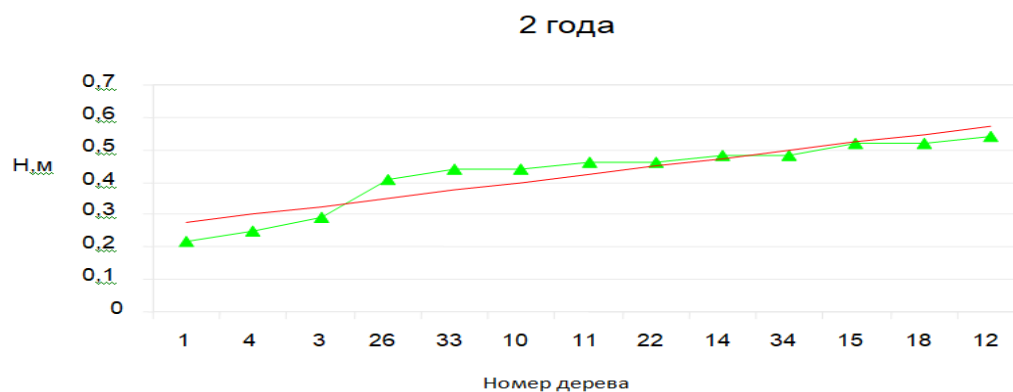




б)



в)



г)

Рисунок 2. Динамика роста и степень подобию у семенного потомства б. пушистой в двух- и десятилетнем возрасте, а) и б) – самоопыление, $\rho = 0.77$; в) и г) – свободное опыление, $\rho = 0.01$

Figure 2. Dynamics of growth and degree of similarity in seed progeny of downy birch at two and ten years of age, a) and b) – self-pollination, $\rho = 0.77$; c) and d) – open pollination, $\rho = 0.01$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Сильная положительная связь выявлена у березы пушистой (рис. 2, а, б) при самоопылении – $\rho = 0.77$, в то время как при свободном опылении она отсутствовала, $\rho = 0.01$ (рис. 2, в, г).

Ранее [23] у указанных селекционных форм этих видов берез было проведено изучение экспрессии генов, кодирующих белки метаболических путей, которые активируются в ответ на абиотический стресс (фенилпропаноидный путь).

Он связан с патогенезом белков (PR1 и PR10), факторов транскрипции (DREB2) и белков позднего эмбриогенеза (LEA). В результате воздействия стресса (засухи) в анализируемых образцах было обнаружено значительное увеличение экспрессии генов *PAL*, *PR-1*, *PR-10* и *DREB2*. Образцы березы 29-58 (Б-12, высокосамофертильная форма) и 233 (межвидовой гибрид, Б-4 x Б. вишневая 1, свободное опыление) были отобраны в качестве наиболее стабильных, демонстрирующих адаптивную реакцию для всех проанализированных генов. Была выявлена активация защитных путей синтеза вторичных метаболитов, а также транскрипционных факторов, участвующих в регуляции генов, вовлеченных в процессы развития стрессоустойчивости, что является свидетельством высокой приспособленности высокосамофертильной формы березы пушистой и межвидового гибрида на основе березы пушистой к меняющимся условиям среды.

По результатам исследований были отобраны лучшие по сохранности и росту селекционные формы и гибриды, часть из которых передана в ВНИИЛГИСбиотех для их клонального микроразмножения и включения в коллекцию *in vitro* для долговременного хранения.

Биотехнологическая оценка коллекционных клонов березы повислой и березы пушистой в культуре in vitro

Воспроизводимость всех этапов культивирования и формирования клонов *in vitro* для различных видов березы с сохранением фенотипических и генетико-селекционных особенностей исходных экземпляров – одно из важных условий успеха биотехнологических разработок. Разработанная нами ранее технология клонального микроразмножения березы *in vitro* достаточно универсальна и воспроизводима [18, 19]. Однако, как показали наши исследования, на всех этапах (получение первичных культур, клонирование, хранение) проявляются межвидовые генотипические особенности. Так, морфогенная активность (которая оценивалась по частоте первичных эксплантов с побегообразованием) демонстрирует заметные различия как по количеству ответов, так и по характеру их проявления (рис. 3, 4). В целом морфогенная активность первичных эксплантов б. повислой в 1,3 раза выше по сравнению с б. пушистой (65 % и 51,2 % соответственно).

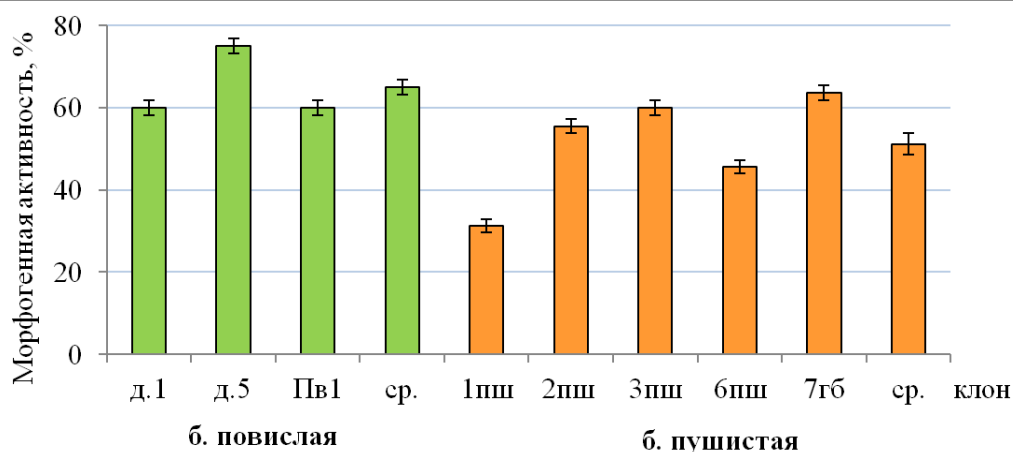


Рисунок 3. Морфогенная активность культур узловых сегментов березы повислой и березы пушистой на питательной среде $\frac{1}{2}$ MS + 6-бензиламинопурин 1 мг/л

Figure 3. Morphogenic activity of silver birch and downy birch's nodal segments cultures on nutrient medium $\frac{1}{2}$ MS + 6-benzylaminopurine 1 mg/l

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

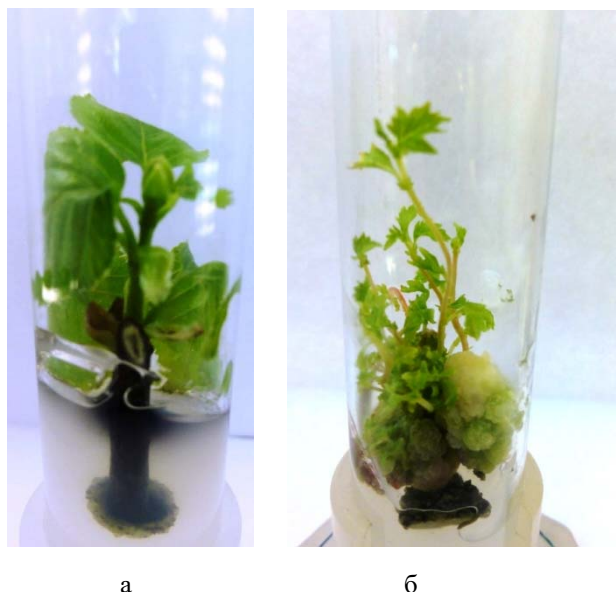


Рисунок 4. Особенности первичного побегообразования эксплантов (стеблевых узлов) березы повислой (а) и березы пушистой (б)

Figure 4. Peculiarities of the primary shoot formation of explants (stem nodes) in silver birch (a) and downy birch (b)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Межклоновые различия б. повислой по количеству морфогенных ответов незначительны и варьируют в пределах 60-75 %, тогда как для клонов б. пушистой эти различия более выражены – 31,2-63,6 %. При этом для березы повислой характерно образование основного пазушного побега, а для березы пушистой – основного совместно с адвентивными (рис. 4). Таким образом, в количественном отношении конечный выход индуцированных побегов у культур березы пушистой существенно выше, чем у березы повислой, что повышает эффективность дальнейших этапов культивирования.

Аномального развития побегов, а также морфологических различий между основными и адвентивными побегами не выявлено, что свидетельствует об отсутствии соматклональной изменчивости на данном этапе. В дальнейших экспериментах был задействован весь индуцированный материал.

В литературе приведены данные о том, что береза, в зависимости от видовой принадлежности, использует различные механизмы адаптации к условиям культивирования *in vitro* [24, 25, 15]. Например, микрорастения березы пушистой при

увеличении продолжительности циклов культивирования проявляют их дефолиацией нижних листьев при сохранении роста в высоту. Микрорастения березы повислой на фоне торможения роста реагируют сокращением длины междоузлий, увеличением размеров листьев. Наши исследования показали, что оптимизация условий культивирования березы с учетом ее видовых особенностей способна устранить подобные риски. Так, сокращение продолжительности цикла микрочеренкования у березы пушистой до 3 месяцев (против 5 месяцев у березы повислой) полностью исключает дефолиацию. Периодическая взаимозаменяемость минерального питания ($\frac{1}{2} MC \leftrightarrow \frac{1}{2} WPM$, питательная среда Woody Plant Medium² [26]) способствует восстановлению ростовых процессов культур березы пушистой.

Результаты анализа сохранности культур, характеризующей их жизнеспособность и адаптивность к условиям культивирования в коллекции, представлены на рис. 5 и 6.

² Lloyd G., McCown B. Commercially-feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia* by use of shoot tip culture // Combined Proceedings, International Plant Propagators' Society. 1980; 30: 421-427.



Рисунок 5. Общий вид микрорастений березы пушистой и березы повислой в коллекции *in vitro* на безгормональной среде $\frac{1}{2}$ MS

Figure 5. General view of microplants of downy birch and silver birch in the *in vitro* collection on a hormone-free medium $\frac{1}{2}$ MS

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

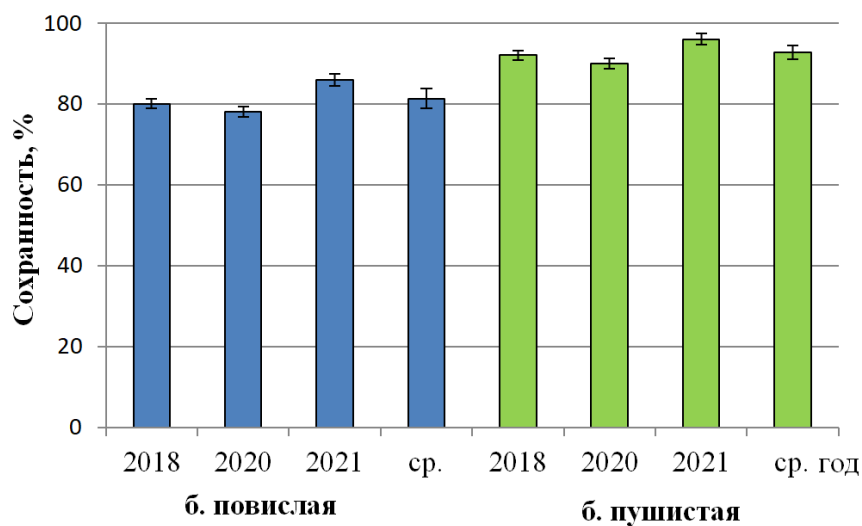


Рисунок 6. Сохранность культур березы в стандартных условиях культивирования *in vitro* на питательной среде $\frac{1}{2}$ MS (представлены усредненные данные 3 циклов микрочеренкования)

Figure 6. Preservation of birch cultures under standard conditions of cultivation *in vitro* on a nutrient medium $\frac{1}{2}$ MS (averaged data of 3 cycles of micrografting are presented)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

В целом коллекционные клоны независимо от длительности хранения *in vitro* характеризовались стабильно высокой (до 96 %) сохранностью, активным спонтанным ризогенезом (до 100 %), формированием нормального морфотипа. Причем сохранность культур существенно не изменялась по годам исследований, но была более высокой у березы пушистой (рис. 6). Видовые особенности микрорклонов березы наиболее заметно проявлялись по

регенерационным показателям (росту в высоту, ризогенной активности, коэффициенту мультипликации). На протяжении всего срока поддержания культур в условиях *in vitro* сохраняется общая тенденция – стабильное проявление ростовых особенностей, как при периодичном черенковании (субкультивировании), так и по годам исследований (табл.).

Таблица

Регенерационная способность клонов березы пушистой и березы повислой в режиме хранения на питательной среде ½ MS *in vitro*

Table

Regeneration ability of downy birch and silver birch clones in storage mode on a nutrient medium ½ MS *in vitro*

Длительность культивирования, лет	Регенерационные показатели	береза пушистая	береза повислая
4	средняя высота, см	6.5 ± 0,1*	4.5 ± 0,1
	коэф. мультипликации	6.0 ± 0,3	4.0 ± 0,1
5	средняя высота, см	8.8 ± 0,1*	5.2 ± 0,2
	коэф. мультипликации	6.0 ± 0,2	–
6	средняя высота, см	9.2 ± 0,3*	5.8 ± 0,3
	коэф. мультипликации	6.0 ± 0,2	5.0 ± 0,4

Примечание: для каждого вида березы представлены средние значения 3 клонов; высоты побегов учитывали через 2 месяца культивирования. *Различия с березой пушистой достоверны при $p < 0,001$.

Note: for each species of birch, the average values of 3 clones are presented; shoot heights were taken into account after 2 months of cultivation. *Differences with downy birch are significant at $p < 0.001$.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Побеги березы пушистой характеризовались более интенсивным ростом в высоту (значения средней высоты побегов статистически выше, чем у березы повислой). Данное соотношение, как и высокие показатели укоренения (до 100 %), стабильны в процессе субкультивирования по годам наблюдения. Значения коэффициента мультипликации, показателей регенерационных потенциалов в зависимости от видовой принадлежности составляют (варьируют) от 4 до 6, что соответствует норме для березы [27].

Одним из неблагоприятных факторов, с которым приходится сталкиваться растениям в течение своей жизни, является низкая температура. В условиях данного эксперимента выживаемость микрорастений *in vitro* после одного года хранения

в холодильной камере (4 ± 1 °C) в среднем составила 53,8 % для б. пушистой и 51,3 % для б. повислой. Для сравнения сохранность побегов карельской березы в аналогичных условиях хранения достигала 100 %. С сокращением срока хранения при пониженной положительной температуре до 6 месяцев доля регенерировавших растений увеличивалась до 76,3 % у березы пушистой и до 82,5 % у березы повислой. Кроме того, после повторного цикла 6-месячного хранения этих же клонов сохранность культур стала еще выше и составила 92,5 % и 90,0 % соответственно. Сравнивая выживаемость березы пушистой и березы повислой при хранении в условиях низкой положительной температуры (4 ± 1 °C), можно говорить об их сходной

адаптивной реакции, отличающейся, например, от реакции карельской березы.

Оценка плоидности коллекционных клонов березы повислой и березы пушистой

Анализ плоидности 8 клонов березы из коллекции *in vitro* подтвердил тетраплоидную природу ($2n=56$) клонов березы пушистой и диплоидную

($2n=28$) – березы повислой, характерную и для их материнских деревьев (рис. 7). Причем в условиях длительного культивирования *in vitro* клоны сохранили свой уровень плоидности, что свидетельствует об их цитологической стабильности.

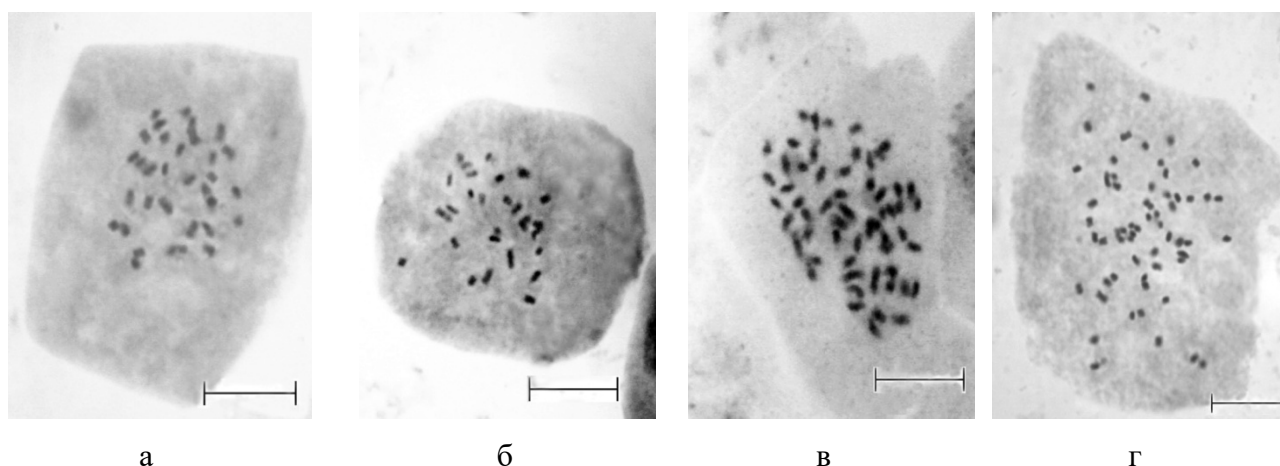


Рисунок 7. Метафазные пластинки клеток корневой меристемы микрорастений с диплоидным ($2n=28$) у клонов березы повислой (а, б) и тетраплоидным ($2n=56$) у клонов березы пушистой (в, г) числом хромосом. Линейка = 10 μm

Figure 7. Metaphase plates of cells of the root meristem of microplants with a diploid ($2n=28$) number of chromosomes in silver birch clones (a, b) and tetraploid ($2n=56$) chromosome numbers in downy birch clones (c, d). Ruler = 10 μm .

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Заключение

Видовая специфика селекционных форм березы проявляется в величине и направлении связи между ростом в ювенильном и репродуктивном возрасте. Наибольшее значение коэффициента ранговой корреляции $\rho = 0,77$ отмечено у полиплоидного вида – березы пушистой, при однократном инбридинге. Это связано, очевидно, с тетраплоидным состоянием и более высоким уровнем самофертильности этого вида. Однократный инбридинг оказывает положительное влияние на активацию защитных путей синтеза вторичных метаболитов, а также транскрипционных факторов, участвующих в регуляции генов, вовлеченных в процессы развития стрессоустойчивости у самофертильных форм березы пушистой.

Экспериментально показано, что длительное хранение коллекционных клонов березы повислой и березы пушистой в условиях *in vitro* по разработанной нами методике [18] обеспечивает стабильно высокую выживаемость (сохранность) и регенерационную способность культур, их цитологическую стабильность. Сохраняются особенности роста клонов в высоту. Причем видовые особенности березы оказали более существенное влияние на активность и характер морфогенеза первичных эксплантов *in vitro*, рост и мультипликационную активность индуцированных побегов по сравнению с межклоновыми в пределах вида. Так, микрорастения клонов полиплоидной березы пушистой характеризовались более интенсивным ростом побегов в высоту, чем березы повислой; первичные экс-

планты имели иной характер морфогенеза (наблюдалась совместная инициация основного побега с адвентивными), чем у березы повислой (формирование основного побега).

Результаты исследований подтверждают, что целевое создание объектов единого генетико-селекционного комплекса (ЕГСК), использование биоресурсных и биотехнологических коллекций может существенно повысить эффективность консервации *ex situ* лесных генетических ресурсов и

клонального микроразмножения деревьев различных видов березы на разных стадиях онтогенеза с сохранением у микрклонов генетических и селекционных особенностей на видовом и индивидуальном уровнях. Это также найдет отражение в теории и практике создания плантационных насаждений березы различного целевого назначения, а использование полиплоидных видов является очень перспективным направлением в лесной генетике и селекции.

Список литературы

1. Staniszewski P., Moskalik T., Bilek M., Szwerc W., Kocjan R., Tomusiak R., Osiak P. The effect of tree age, daily sap volume and date of sap collection on the content of minerals and heavy metals in silver birch (*Betula pendula* Roth) tree sap / PLOS ONE. 2020; 15(12):1-19. DOI: 10.1371/journal.pone.0244435.
2. Bona A., Kulesza U., Jadwiszczak K. A. Clonal diversity, gene flow and seed production in endangered populations of *Betula humilis* Schrk. *Tree Genetics & Genomes*. 2019;15;4: 50. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1357-2>.
3. Медведева С. О., Черепанова О. Е., Толкач О. В., Пономарев В. И., Малосиева Г. В. Данные по изменчивости региона ITS 1–2 ядерной рибосомальной ДНК *Betula turkestanica*, *B. tianschanica*, *B. procurva*. *Лесохозяйственная информация*. 2023;2: 127–135. DOI 10.24419/ LHI.2304-3083.2023.2.10.
4. Bona A., Petrova G., Jadwiszczak K.A. Unfavourable habitat conditions can facilitate hybridisation between the endangered *Betula humilis* and its widespread relatives *B. pendula* and *B. pubescens*. *Plant Ecology and Diversity*. 2018;11(3): 295-306. doi: 10.1080/17550874.2018.1518497.
5. Anamthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Þórsson Æ.T., Jóhannsson M. H. Naturally occurring triploid birch hybrids from woodlands in Iceland are partially fertile. *New Forests*. 2021;52: 659–678. doi: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09816-z>.
6. Zhang H., Ding J., Holstein N., Wang N. *Betula mcallisteri* sp. nov. (sect. *Acuminatae*, *Betulaceae*), a new diploid species overlooked in the wild and in cultivation, and its relation to the widespread *B. luminifera*. *Front. Plant Sci*. 2023; 14: 1113274. doi: 10.3389/fpls.2023.1113274.
7. 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. doi: <https://doi.org/10.3390/f120912>.
8. Anamthawat-Jónsson K. Hybrid introgression: the outcomes of gene flow in birch. *Science Asia*. 2019;45: 203–211. doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.
9. Anamthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Þórsson A.T., Hallsdóttir M. Microscopical palynology: Birch woodland expansion and species hybridisation coincide with periods of climate warming during the Holocene epoch in Iceland. *J Microsc*. 2023;291(1): 128-141. doi: 10.1111/jmi.13175. Epub 2023 Feb 28. PMID: 36779661.
10. Сингатуллин И. К., Шайхразиев Ш. Ш., Глушко С. Г. Естественное возобновление березы повислой (*Betula pendula* Roth) в лесостепной зоне республики Татарстан. *Лесной вестник. Forestry Bulletin*. 2021;25(5): 14-21. doi: 10.18698/2542-1468-2021-5-14-21. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47276762>.
11. Полиморфизм и биоразнообразие лесообразующих пород в искусственных и естественных насаждениях Центральной лесостепи : моногр. / И. Ю. Исаков, В. И. Михин, Г. С. Сидоров [и др.]. – Воронеж, 2021. – 158 с. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48044502>.
12. 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>.

13. Михин В. И., Михина Е. А. Особенности формирования защитных насаждений из берёзы повислой в Центральной лесостепи России. Лесотехнический журнал. 2019;9(4): 41-49. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41748521>.
14. Isakov I. Yu. The effect of a single inbreeding on the growth and development of fast-growing tree species, *Betula pendula* and *Betula pubescens*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021;875 012014. doi: 10.1088/1755-1315/875/1/012014.
15. Yancheva S., Kondakova V. Plant tissue culture technology: Present and future development. Bioprocessing of plant in vitro systems. Cham, Springer. 2018; 39-63. doi: 10.1007/978-3-319-54600-1_16.
16. Третьякова И. Н., Пак М. Э., Орешкова Н. В., Падутов В. Е. Регенерационная способность клеточных линий лиственницы сибирской в культуре *in vitro*. Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2022; 6: 585-596. DOI: 10.31857/S1026347022050195. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49297220>.
17. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Карельская береза – уникальный биологический объект. Успехи современной биологии. 2019; 139(5): 419–433. DOI: 10.1134/S0042132419050107. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39796762>.
18. Машкина О. С., Табацкая Т. М., Внукова Н. И. Технология долгосрочного хранения в культуре *in vitro* ценных генотипов березы и выращивание на ее основе посадочного материала. Биотехнология. 2019; 35(3): 57-67. doi: 10.21519/0234-2758-2019-35-3-57-67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38304525>.
19. Табацкая Т. М., Машкина О. С. Опыт длительного хранения коллекции ценных генотипов березы с использованием безгормональных питательных сред. Лесоведение. 2020; (2): 147-161. DOI: 10.31857/S0024114820020084. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42414256>.
20. Sedgwick P. Spearman's rank correlation coefficient. BMJ Clinical Research. 2018; 349: g7327. DOI: 10.1136/bmj.g7327.
21. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with Tobacco tissue cultures. *Physiol. Plantarum*. 2018; 15(3): 473-497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.
22. Машкина О. С., Табацкая Т. М. Оценка длительно культивируемых *in vitro* коллекционных клонов ивы по данным хромосомного анализа. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2023;2: 46-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54070178>.
23. Grodetzkaya T., Evlakov P., Isakov I., Padutov V. The effect of drought on the expression of stress resistance genes in perspective forms of birch / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions". 2020; 012039. DOI:10.1088/1755-1315/595/1/012039.
24. Tikhomirova T. S., Krutovsky K. V., Shestibratov K. A. Molecular traits for adaptation to drought and salt stress in birch, oak and poplar species. *Forests*. 2023;14(1). Pp. 7. DOI: 10.3390/f14010007.
25. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Влияние кадмия на геммо- и ризогенез карельской березы. Физиология растений. 2022; 69(4): 408-416. DOI: 10.31857/S0015330322040194. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48658983>.
26. Gailis A., Samsone I., Šēnhofa S. et al. Silver birch (*Betula pendula* Roth.) culture initiation *in vitro* and genotype determined differences in micropropagation. *New Forests*. 2021;52;5: 791-806. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09828-9>.
27. Лебедев В. Г., Шестибратов К. А. Широкомасштабное клональное микроразмножение древесных лесных пород для закладки лесных плантаций // Биология клеток растений *in vitro* и биотехнология : тезисы докладов XI Межд. конф. (23-27 сентября 2018, Минск, Беларусь). – Беларусь, 2018. – С. 126–127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36622494>.

References

1. Staniszewski P., Moskalik T., Bilek M., Szwerc W., Kocjan R., Tomusiak R., Osiak P. The effect of tree age, daily sap volume and date of sap collection on the content of minerals and heavy metals in silver birch (*Betula pendula* Roth) tree sap. PLOS ONE. 2020; 15(12). DOI: 10.1371/journal.pone.0244435.
2. Bona A., Kulesza U., Jadwiszczak K. A. Clonal diversity, gene flow and seed production in endangered populations of *Betula humilis* Schrk. Tree Genetics & Genomes. 2019;15;4: 50. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1357-2>.
3. Medvedeva S.O., Cherepanova O.E., Tolkach O.V., Ponomarev V.I., Malosieva G.V. Dannye po izmenchivosti regiona ITS 1–2 yadernoy ribosomal'noy DNK *Betula turkestanica*, *B. tianschanica*, *B. procurva*. Leso-kozyaystvennaya informatsiya. 2023;2: 127–135. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2023.2.10 (in Russ.).
4. Bona A., Petrova G., Jadwiszczak K.A. Unfavourable habitat conditions can facilitate hybridisation between the endangered *Betula humilis* and its widespread relatives *B. pendula* and *B. pubescens*. Plant Ecology and Diversity. 2018;11(3):295-306. doi: 10.1080/17550874.2018.1518497.
5. Anamthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Þórsson 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>.
6. Zhang H., Ding J., Holstein N., Wang N. *Betula mcallisteri* sp. nov. (sect. *Acuminatae*, *Betulaceae*), a new diploid species overlooked in the wild and in cultivation, and its relation to the widespread *B. luminifera*. Front. Plant Sci. 2023; 14:1113274. doi: 10.3389/fpls.2023.1113274.
7. 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>.
8. Anamthawat-Jónsson K. Hybrid introgression: the outcomes of gene flow in birch. Science Asia. 2019;45: 203–211. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.
9. Anamthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Þórsson A.T., Hallsdóttir M. Microscopical palynology: Birch woodland expansion and species hybridisation coincide with periods of climate warming during the Holocene epoch in Iceland. J Microsc. 2023;291(1):128-141. doi: 10.1111/jmi.13175. Epub 2023 Feb 28. PMID: 36779661.
10. Singatullin I.K., Shaikhraiev S.S., Glushko S.G. *Betula pendula* Roth natural regeneration in forest-steppe zone of Tatarstan republic. Forestry Bulletin. 2021;25(5): 14-21. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-5-14-21 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47276762> (in Russ.).
11. Isakov I. Yu., Mikhin V. I., Sidorov G. S. et al. Polymorphism and biodiversity of forest-forming species in artificial and natural plantings of the Central forest-steppe: Monograph. Voronezh, 2021; 158 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48044502> (in Russ.).
12. Popov V. K. Birch forests of the Central forest-steppe of Russia. Voronezh: Publishing House Voronezh. gos. lesotechn. academies. 2003; 424 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19505353> (in Russ.).
13. Mikhin V. I., Mikhina E. A. Features of the formation of protective stands of silver birch in the Central forest-steppe of Russia. Forestry Engineering Journal. 2019; 9(4): 41-49. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41748521> (in Russ.).
14. Isakov I. Yu. The effect of a single inbreeding on the growth and development of fast-growing tree species, *Betula pendula* and *Betula pubescens*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021;875 012014: DOI 10.1088/1755-1315/875/1/012014.
15. Yancheva S., Kondakova V. Plant tissue culture technology: Present and future development. Bioprocessing of plant in vitro systems. Cham, Springer. 2018; 39-63. DOI: 10.1007/978-3-319-54600-1_16.
16. Tretyakova I. N., Park M. E., Oreshkova N. V., Padutov V. E. The Regenerative Capacity of Siberian Larch Cell Lines In Vitro. Biology Bulletin. 2022. 49(6): 609-619. DOI: 10.31857/S1026347022050195. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49297220> (in Russ.).

17. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Karel'skaya bereza – unikal'ny biologicheskiy ob'ekt. Uspehi sovremennoy biologii. 2019; 139(5): 419–433. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0042132419050107. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39796762>.
18. Mashkina O. S., Tabatskaya T. M., Vnukova N. I. Technologiya dolgosrochnogo hraneniya v kul'ture *in vitro* cennyh genotipov berezy i vyrashivaniye na ee osnove posadochnogo materiala // Biotechnologiya. 2019; 35(3): 57-67 (in Russ.). DOI: 10.21519/0234-2758-2019-35-3-57-67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38304525>.
19. Tabatskaya T. M., Mashkina O. S. Opyt dolgovremennogo hraneniya kollekcii cennyh genotipov berezy s ispol'zovaniem bezgormonal'nyh pitatel'nyh sred. Lesovedeniye. 2020; (2): 147-161 (in Russ.). DOI: 10.31857/S0024114820020084. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42414256>.
20. Sedgwick P. Spearman's rank correlation coefficient. BMJ Clinical Research. 2014; 349: g7327. DOI: 10.1136/bmj.g7327.
21. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with Tobacco tissue cultures. Physiol. Plantarum. 2006; 15(3): 473-497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x.
22. Tabatskaya T. M., Mashkina O. S. Otsenka dlitel'no kul'tiviruemyh *in vitro* kollektionnyh klonov ivy po dannym chromosomnogo analiza. Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya. 2023;2: 46-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54070178> (in Russ.).
23. Grodet'skaya T., Evlakov P., Isakov I., Padutov V. The effect of drought on the expression of stress resistance genes in perspective forms of birch / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Forestry Forum "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions". 2020; C. 012039. DOI:10.1088/1755-1315/595/1/012039.
24. Tikhomirova T. S., Krutovsky K. V., Shestibratov K. A. Molecular traits for adaptation to drought and salt stress in birch, oak and poplar species. Forests. 2023;14(1). 7. DOI: 10.3390/f14010007.
25. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Effect of cadmium on gemmation and rhizogenesis in Karelian birch. Russian Journal of Plant Physiology. 2022; 69(4): 408-416. DOI: 10.31857/S0015330322040194 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48658983>.
26. Gailis A., Samsone I., Šēnhofa S. et al. Silver birch (*Betula pendula* Roth) culture initiation *in vitro* and genotype determined differences in micropropagation. New Forests. 2021;52;5: 791-806. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09828-9>.
27. Lebedev V. G., Shestibratov K. A. Large-scale clonal micropropagation of forest trees for short-rotation plantations // XI-th International conference «The biology of plant cells *in vitro* and biotechnology» (September 23–27, 2018, Minsk, Republic of Belarus). Belarus, 2018; 126-127 (in Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36622494>.

Сведения об авторах

✉ *Исаков Игорь Юрьевич* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесных культур, селекции и лесомелиорации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; e-mail: labgen@vgtla.vrn.ru.

Табацкая Татьяна Михайловна – старший научный сотрудник отдела лесной генетики и биотехнологии ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tatyana.tabacky@gmail.com.

Внукова Наталья Ивановна – научный сотрудник отдела лесной генетики и биотехнологии ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: natalya.vnuckova@yandex.ru

Машина Ольга Сергеевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры генетики, цитологии и биоинженерии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», ведущий научный сотрудник отдела

лесной генетики и биотехнологии ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: mashkinaos@mail.ru.

Михин Вячеслав Иванович – доктор сельскохозяйственных наук, заведующий кафедрой лесных культур, селекции и лесомелиорации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; e-mail: Dr.Mikhin@yandex.ru.

Зоран Говедар – доктор лесных наук, действительный профессор, член-корреспондент Академии наук и искусств Республики Сербской, кафедра лесоводства, факультет лесного хозяйства Баня-Луки, Академия наук и искусств Республики Сербской, г. Баня-Лука, Республика Сербская/Босния и Герцеговина; e-mail: zoran.govedar@sf.unibl.org.

Information about the authors

✉ *Igor Yu. Isakov* – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Forest Crops, Breeding and Forest Reclamation, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str, 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; e-mail: labgen@vglta.vrn.ru.

Tatiana M. Tabatskaya – Senior Researcher of Forest Genetics and Biotechnology Department, All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Voronezh, Russian Federation; e-mail: tatyana.tabacky@gmail.com.

Natalya I. Vnukova – Researcher of Forest Genetics and Biotechnology Department; All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Voronezh, Russian Federation; e-mail: natalya.vnuckova@yandex.ru.

Olga S. Mashkina – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Chair of Genetics, Cytology and Bioengineering, Voronezh State University, Leading Researcher of Forest Genetics and Biotechnology Department, All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Voronezh, Russian Federation; e-mail: mashkinaos@mail.ru.

Vyacheslav I. Mikhin – Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Department of Forest Crops, Breeding and Forest Reclamation, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; e-mail: Dr.Mikhin@yandex.ru.

Zoran Govedar – Doctor of Forestry Sciences, Full professor, Correspondence member of Academy of Science and Arts of the Republic of Srpska, Department of Silviculture, Faculty of Forestry Banja Luka, Academy of Science and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka, Republic of Srpska/Bosnia and Herzegovina, e-mail: zoran.govedar@sf.unibl.org.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3>

УДК 630*232 : 630*231 : 630*228



Формирование структурно-функциональной организации молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) смешанного искусственно-естественного происхождения в условиях сосняков ягодникового и разнотравного 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

Восстановление лесов, изучение процессов формирования их структуры и продуктивности в настоящее время является одной из самых актуальных задач. Изучены особенности формирования 12-летних лесных культур и сопутствующего естественного возобновления сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях сосняка ягодникового и сосняка разнотравного Среднего Урала, на пробных площадях, заложенных в соответствии с имеющимися требованиями. У каждого дерева сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) измерялись диаметр на середине высоты, высота и рассчитывался объем ствола в коре. Ранговое распределение деревьев проводилось путем расчета их редуцированных чисел, определения амплитуды редуцированных чисел и последующего распределения на 5 основных классов. На 12-й год после посадки приживаемость в сосняке ягодниковом составила 47,0 %, а в сосняке разнотравном – 35,3 %. В сосняке ягодниковом, с учетом сопутствующего естественного возобновления сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), происходит формирование сосняка искусственно-естественного происхождения, а в сосняке разнотравном формируется сосняк естественно-искусственного происхождения. Процесс естественного возобновления сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) происходил в течение нескольких лет. Деревья сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) естественного происхождения по биологическому возрасту на 2-7 лет моложе, чем деревья искусственного происхождения. Деревья сосны искусственного происхождения в сосняке ягодниковом значительно превосходят по средней величине диаметра на середине высоты, высоты и объему ствола такие же деревья в сосняке разнотравном. Деревья сосны естественного происхождения в сосняке ягодниковом достоверно превосходят по средней величине диаметра на середине высоты деревья в сосняке разнотравном, но существенно уступают им по средней высоте ствола и практически не различаются по среднему объему ствола дерева. Деревья искусственного происхождения по величине диаметра на середине высоты, высоте и объему ствола достоверно превосходят деревья естественного происхождения как в сосняке ягодниковом, так и в сосняке разнотравном. Распределение деревьев по диаметру и высоте в молодняках искусственного и естественного происхождения как в сосняке ягодниковом, так и в сосняке разнотравном отличаются распределением, близким к нормальному. Распределение деревьев искусственного и естественного происхождения в сосняке ягодниковом и сосняке разнотравном по объему ствола отличается левосторонней асимметрией и островершинностью. При распределении по ранговым классам высоты обеспечивается значительное снижение уровня изменчивости биометрических показателей. В естественных молодняках сохраняется очень высокий уровень изменчивости по объему ствола в коре. Как в искусственных, так и в естественных молодняках основной (86,3-97,5 %) запас древесины ствола в коре приходится на деревья I-III классов высоты. В сосняке разнотравном искусственные и естественные молодняки имели практически одинаковые величины

запаса, что подтверждает формирование молодняка сосны естественно-искусственного происхождения. В сосняке ягодниковом возобновление березы не представляет значительной конкуренции сосне.

Ключевые слова: *сосна обыкновенная, Pinus sylvestris L., естественные и искусственные молодые насаждения, запас древесины*

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. Формирование структурно-функциональной организации молодняков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) смешанного искусственно-естественного происхождения в условиях сосняков ягодникового и разнотравного Среднего Урала / М. В. Ермакова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 43–58. – Библиогр.: с. 56–58 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3>.

Поступила 21.12.2022. *Пересмотрена* 02.07.2023. *Принята* 11.08.2023. *Опубликована онлайн* 18.09.2023.

Article

Formation of the structural and functional organization of young stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of mixed artificial and natural origin in the conditions of berry pine forests of and forb pine forests of the Middle Urals

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, Russian Federation

Abstract

Restoration of forests, the study of the processes of formation of their structure and productivity, is currently one of the most urgent tasks. The features of the formation of 12-year-old forest plantations and the concomitant natural regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) were studied under the conditions of berry pine forest and forb pine forest of the Middle Urals, on trial plots established in accordance with the existing requirements. For each Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) tree, the diameter at the middle height and height were measured, and the volume of the trunk in the bark was calculated. The rank distribution of trees was carried out by calculating their reduction numbers, determining the amplitude of the reduction numbers and subsequent distribution into 5 main classes. In the 12th year after planting, the survival rate in the berry pine forest was 47.0%, and in the forb pine forest - 35.3%. In the berry pine forest, taking into account the concomitant natural regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), a pine forest of artificial and natural origin is being formed, and in the forb pine forest, a pine forest of natural and artificial origin is being formed. The process of natural renewal of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) took place over several years. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees of natural origin are 2-7 years younger in biological age than trees of artificial origin. Pine trees of artificial origin in the berry pine forest significantly exceed the average diameter at the middle of the height, height and trunk volume of the same trees in the forb pine forest. Pine trees of natural origin in the berry pine forest are significantly superior in average diameter at the middle of the height to trees in the forb pine forest, but they are significantly inferior to them in the average trunk height and practically do not differ in the average volume of the tree trunk.

Trees of artificial origin in terms of diameter at the middle of the height, height and volume of the trunk significantly exceed trees of natural origin both in the berry pine forest and in the mixed grass pine forest. The distribution of trees by diameter and height in young forests of artificial and natural origin, both in the berry pine forest and in the forb pine forest, is characterized by a distribution close to normal. The distribution of trees of artificial and natural origin in the berry pine forest and the forb pine forest in terms of trunk volume is distinguished by left-sided asymmetry and sharpness. When distributed by rank height classes, a significant reduction in the level of variability of biometric indicators is provided. However, in natural young stands, a very high level of variability in stem volume in the bark remains. Both in artificial and natural young stands, the main (86.3-97.5%) stock of trunk wood in the bark falls on trees of I-III height classes. In the forb pine forest, artificial and natural young stands had almost the same reserve values, which confirms the formation of young pine stands of natural artificial origin. In the berry pine forest, birch renewal does not represent significant competition to pine. In the forb pine forest, birch creates serious competition for pine and, probably, the formation of deciduous-coniferous plantations and oppression of pine.

Keywords: *Scots pine, Pinus sylvestris L., natural and artificial young stands, timber stock*

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. (2023). Formation of the structural and functional organization of young stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of mixed artificial and natural origin in the conditions of berry pine forests and forb pine forests of the Middle Urals. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 43-58 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/3>.

Received 21.12.2022. *Revised* 02.07.2023. *Accepted* 11.08.2023. *Published online* 18.09.2023.

Введение

Одним из важнейших природоохранных направлений в настоящее время, несомненно, является восстановление древесной растительности на территориях, утративших ее в силу самых различных причин. Известно, что лесовосстановление может проводиться как естественным, так и искусственным путем, а также с использованием комбинированного способа, когда посадка лесных культур дополняется сопутствующим естественным возобновлением. Хотя следует отметить, что, как показывает опыт, в настоящее время основной упор восстановления лесов вследствие масштабных объемов обезлесенных территорий делается на проведение искусственного лесовосстановления путем создания лесных культур. В том числе посадка лесных культур нередко проводится и в тех условиях, где восстановление леса может быть, хотя бы частично, обеспечено естественным путем. В свою

очередь, искусственное лесовосстановление, даже на участках, где создание лесных культур действительно необходимо, зачастую сопровождается, при наличии обсеменителей, существенным количеством естественного возобновления. Подобные процессы определяют комбинированный способ лесовосстановления. В результате формируются молодняки смешанного искусственно-естественного происхождения. Следует заметить, что процессы формирования таких молодняков еще недостаточно изучены. Немногочисленные работы, посвященные этому вопросу, в основном, касаются только изучения количественных показателей сопутствующего естественного возобновления на площадях лесных культур [1] и, очень незначительно, затрагивают вопросы изучения структурно-функциональной организации таких молодняков [2, 3]. К тому же исследования строения и таксационных показателей и других характеристик в значи-

тельной степени касаются искусственных насаждений значительно более старшего возраста [4-7].

Кроме того, в настоящее время особое значение приобретают вопросы, связанные с оценкой продуктивности формирующихся молодняков древесных пород. Сложность изучения их продуктивности отмечалась давно. Причина – в очень высокой вариабельности объема стволов деревьев молодняков [8]. Это требует разработки определенных методических подходов к установлению запасов древесины стволов молодых деревьев.

Представленные проблемы, несомненно, затрагивают вопросы изучения формирования молодняков сосны обыкновенной – одной из наиболее распространенных и важнейших древесных пород России.

Материалы и методы

Цель исследований – изучить особенности формирования ценотической структуры и запасов древесины в искусственных молодняках сосны при сопутствующем естественном возобновлении.

Объекты исследований – 12-летние производственные искусственные молодняки сосны обыкновенной на вырубках в типах леса сосняк ягодниковый (С яг.) и сосняк разнотравный (С ртр.) Зауральской холмисто-предгорной провинции южнотаежного округа [9] Средне-Уральского таежного лесорастительного района³.

Исследованные пробные площади (ПП) были заложены в соответствии с имеющимися требованиями [10, 11]. При изучении естественного молодняка сосны в междурядьях для установления его возраста у всех деревьев подсчитывалось число годичных побегов. Для уточнения возраста (количества годичных побегов) в нижней части ствола дополнительно изучались молодые сеянцы и деревца в возрасте 1-5 лет, произрастающие в условиях соответствующего типа леса на соседних участках [12, 13].

Создание лесных культур на обеих ПП выполнялось путем посадки 2-летних сеянцев сосны по бороздам. Шаг посадки на участках в обоих ти-

пах леса составлял 0,5 м. В типе леса сосняк ягодниковый средняя ширина междурядий составила 3,1 м (высажено 6,6 тыс. шт. на 1 га), в типе леса сосняк разнотравный – 6,0 м (высажено 3,4 тыс. шт. на 1 га).

При полевых исследованиях у каждого дерева, как в искусственных молодняках, так и у сопутствующего естественного возобновления, в междурядьях измерялись диаметр на середине высоты ($D_{0,5H}$) и высота (H). Объем первоначальной выборки составил не менее 100 шт. деревьев искусственного и естественного происхождения.

Объем ствола дерева рассчитывался по классической формуле срединного сечения:

$$\text{Объем ствола} = \gamma * H, \quad (1)$$

где γ – площадь сечения ствола на середине высоты; H – высота ствола.

Уровень изменчивости определялся в соответствии с эмпирической шкалой Мамаева [13]:

Таблица 1

Уровень изменчивости

Table 1

Variability level

Уровень / Level	Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %
Очень низкий Very low level	< 7
Низкий Low level	8 – 12
Средний Average	13 – 20
Повышенный Elevated level	21 – 30
Высокий High level	31 – 40
Очень высокий Very high level	> 40

Камеральная обработка и анализ полученных данных включали распределение деревьев по классам роста в высоту путем расчета их редуцированных чисел и последующего распределения на 5 ранговых классов.

³ Правила лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления от 29 декабря 2021 г. № 1024.

Определение редуцированных чисел (ранговых коэффициентов) проводилось по соответствующей формуле [14]:

$$R_{cp.} = R_{cp.} = M_{it} / M_{cp. t}; \quad (2)$$

где $R_{cp.}$ – ранговый коэффициент по отношению к среднему; M_{it} – размеры i -го дерева или сеянца в момент t ; $M_{cp. t}$ – размеры среднего дерева или сеянца в популяции в момент t .

После распределения деревьев по ранговым классам проводились дополнительные измерения биометрических показателей не менее чем у 50 штук деревьев по каждому классу.

Апостериорное сравнение средних проводилось с помощью t -критерия Стьюдента и LSD-теста [15].

Математическая обработка полученных данных проводилась с помощью пакета программ Excel и STATISTICA 10.

Результаты и обсуждение

Как показали наши исследования, на 12-й год после посадки на участке в типе леса С яг. приживаемость составила 47,0 %, а на участке в типе леса С ртр. – 35,3 % от общего количества высаженных растений.

В то же время, в междурядьях на обеих ПП происходили довольно интенсивные процессы сопутствующего естественного возобновления сосны вследствие того, что вырубка и последующая подготовка лесокультурной площади создали условия

для заселения и выживания всходов сосны [16-18]. Семена сосны обеспечивались за счет обсеменителей в соседних древостоях и, частично, вследствие семеношения самих культур. Однако интенсивность процессов естественного заселения сосны на ПП значительно различалась. На 12-й год функционирования площади в С яг. численность деревьев естественного происхождения в междурядьях была почти в 3 раза меньше (1,04 тыс. шт. на 1 га), чем сохранившихся деревьев искусственного происхождения (3,10 тыс. шт. на 1 га). Таким образом, происходит формирование сосняка искусственно-естественного происхождения. На ПП в типе леса С ртр., напротив, численность деревьев естественного происхождения в междурядьях (4,30 тыс. шт. на 1 га) была почти в 3,5 раза больше, чем сохранившихся деревьев (1,20 тыс. шт. на 1 га), высаженных в бороздах. В данном случае имеет место формирование сосняка естественно-искусственного происхождения и фактически наблюдается комбинированный способ лесовосстановления.

Как показал анализ полученных данных (рис. 1), деревья сосны искусственного происхождения в сосняке ягодниковом значительно превосходили (при $p \leq 0,05$) по средней величине диаметра, высоты и объема ствола дерева аналогичного происхождения в сосняке разнотравном. Также деревья естественного происхождения в сосняке ягодниковом достоверно превосходили по средней величине диаметра дерева такого же происхождения в сосняке разнотравном.

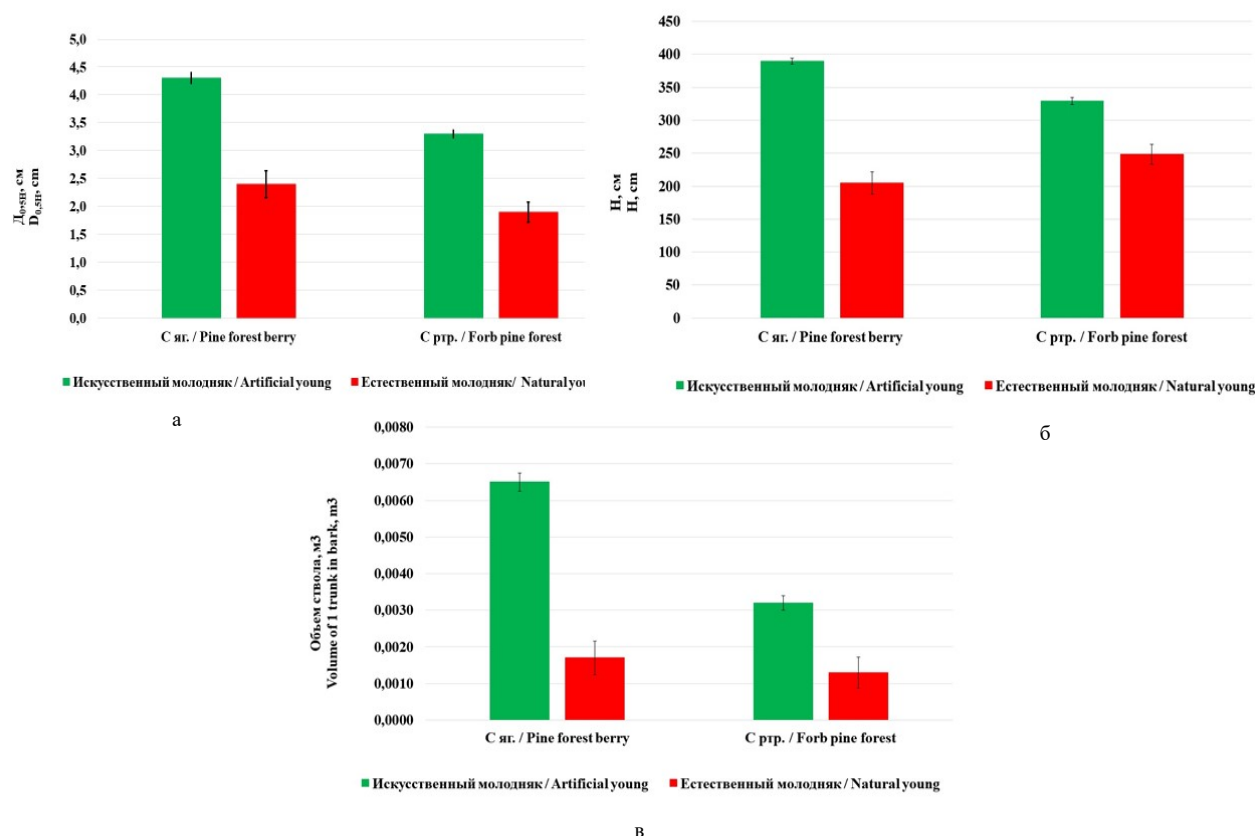


Рисунок 1. Биометрические характеристики деревьев сосны в молодняках на момент учета (а – диаметр на середине высоты; б – высота ствола; в – объем ствола)

Figure 1. Biometric characteristics of pine trees in young stands at the time of registration (a – diameter at mid-height; б – height; в – trunk volume)

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's composition

В то же время деревья естественного происхождения в сосняке разнотравном имели существенно более высокий показатель средней высоты и практически не различались по среднему объему ствола по сравнению с деревьями естественного происхождения в сосняке ягодниковом.

В свою очередь, деревья искусственного происхождения достоверно (при $p \leq 0,05$) превосходили деревья естественного происхождения как в С яг., так в С ртр.

Изучение возрастной структуры естественных молодняков на обеих ПП (рис. 2) позволило установить, что, процессы естественного заселения сосной [18, 19] междурядий происходили в течение нескольких лет.

Как видно из рис. 2, наибольшая доля в С яг. представлена деревьями, выросшими из всходов на 3-й, а в С ртр. – на 2-й год после рубки. Заселение и выживание всходов продолжалось в течение

5-6 лет, а потом полностью прекратилось. Молодняки сосны в междурядьях, таким образом, относят к одновозрастным, в отличие от абсолютно одновозрастных искусственных молодняков в бороздах. Таким образом, деревья сосны в междурядьях оказались по биологическому возрасту на 2-7 лет моложе, чем деревья искусственного происхождения в бороздах (с учетом пребывания семян в питомнике).

Согласно характеристикам асимметрии и эксцесса с учетом ошибок (табл. 2) основных таксационных показателей – диаметра и высоты – деревья в молодняках искусственного и естественного происхождения как на ПП С яг., так и на ПП С ртр., в целом, отличаются распределением, близким к нормальному. Однако следует заметить, что распределение по высоте естественного молодняка С ртр. отличается плосковершинным эксцессом.

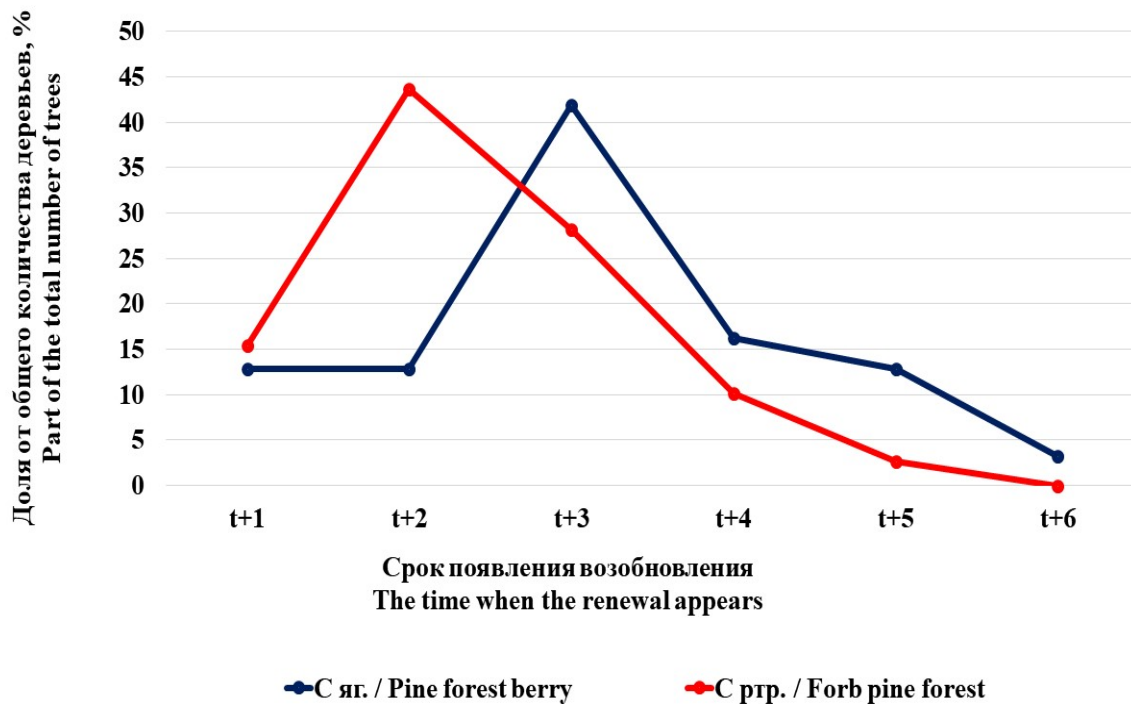


Рисунок 2. Возрастная структура подроста сосны (t – год прекращения рубки; t – деревья подроста, из появившихся через 1 год после прекращения рубки и т.д.)

Figure 2. Age structure of pine undergrowth (t – year of cessation of felling; t – trees of undergrowth, from sprouting appeared 1 year after cessation of felling, etc.)

Источник: собственные вычисления автора
Source: the author's composition

Распределение деревьев по объему ствола по характеристикам эксцесса также имеет показатели, близкие к нормальному распределению, однако отличается некоторой левосторонней асимметрией.

В соответствии с величинами асимметрии и эксцесса (с учетом ошибки) в молодняках искусственного и естественного происхождения как на ПП С яг., так и на ПП С ртр., распределение деревьев по диаметру и высоте (табл. 2) в целом характеризуется близким к нормальному. Однако следует заметить, что распределение по высоте естественного молодняка С ртр. отличается значительным плосковершинным эксцессом.

Распределение деревьев искусственного и естественного происхождения по объему ствола в молодняках, как С яг., так и С ртр., отличается левосторонней асимметрией. По показателям эксцес-

са распределения по объему ствола искусственный молодняк С яг. имеет показатели, близкие к нормальному, а в С ртр. отличается определенной плосковершинностью. По показателям эксцесса распределение по объему ствола молодняки естественного происхождения как в типе леса С яг., так и в типе леса С ртр. отличаются островершинностью.

На особенности распределения и изменчивости показателей в естественных молодняках, несомненно, оказывает влияние и особенность их возрастной структуры. Тем не менее, по совокупности характеристик следует принять, что при распределении деревьев по ранговым классам следует ориентироваться на ранговую структуру по высоте.

Показатели распределения и вариабельности молодняков сосны на ПП

Indicators of distribution and variability of young pine stands on SP

Показатели	Биометрические показатели		
	Д _{0,5Н} , см D _{0,5Н} , cm	Н, см H, cm	Объем 1 ствола в коре, м ³ Volume of 1 trunk in bark, m ³
С яг. Pine forest berry			
Искусственный молодняк Young artificial plantation			
V, %	23,20	15,70	55,72
As ± m _{as}	0,023 ± 0,1707	-0,299 ± 0,1707	0,650 ± 0,1707
Ex ± m _{ex}	-0,630 ± 0,3397	-0,125 ± 0,3397	0,040 ± 0,3397
Естественный молодняк Young natural plantation			
V, %	55,62	45,72	155,57
As ± m _{as}	1,153 ± 0,4210	0,462 ± 0,4210	2,403 ± 0,4210
Ex ± m _{ex}	0,812 ± 0,8120	-0,558 ± 0,8120	5,127 ± 0,8120
С ртр. Forb pine forest			
Искусственный молодняк Young artificial plantation			
V, %	24,26	17,56	61,17
As ± m _{as}	0,127 ± 0,2379	0,119 ± 0,2379	0,949 ± 0,2379
Ex ± m _{ex}	-0,438 ± 0,4716	0,759 ± 0,4716	-0,857 ± 0,4716
Естественный молодняк Young natural plantation			
V, %	60,00	45,72	116,33
As ± m _{as}	0,454 ± 0,3782	0,019 ± 0,1707	1,372 ± 0,1707
Ex ± m _{ex}	0,981 ± 0,7410	-1,868 ± 0,3397	1,749 ± 0,3397

Примечание (Note). Д_{0,5Н} – диаметр на середине высоты ствола (diameter at mid-height of the stem); Н – высота ствола (height of trunk); V – коэффициент вариации (coefficient of variation); As – асимметрия (asymmetry); m_{as} – ошибка асимметрии (asymmetry error); Ex – эксцесс (excess); m_{ex} – ошибка эксцесса (kurtosis error).

Источник: собственные вычисления автора
Source: the author's composition

Полученные данные хорошо согласуются с ранее высказанным утверждением, что ранговая структура молодняков сосны прежде всего стабилизируется именно по высоте, уже к 8-летнему возрасту [14]. Хотя необходимо отметить, что в данном случае, в соответствии с показателями, можно

говорить о стабилизации дифференциации по высоте [20-21] только для искусственных молодняков. В естественных молодняках, в свою очередь, процессы дифференциации, по всей видимости, еще довольно активно продолжаются.

В результате математической обработки полученных данных была определена амплитуда редуционных чисел по высоте ствола для молодняков искусственного и естественного происхожде-

ния. Для С яг. она составила 0,885 и 1,899, а для С ртр. 0,710 и 1,022, соответственно. Результаты распределения по ранговым классам высоты приведены на рис. 3.

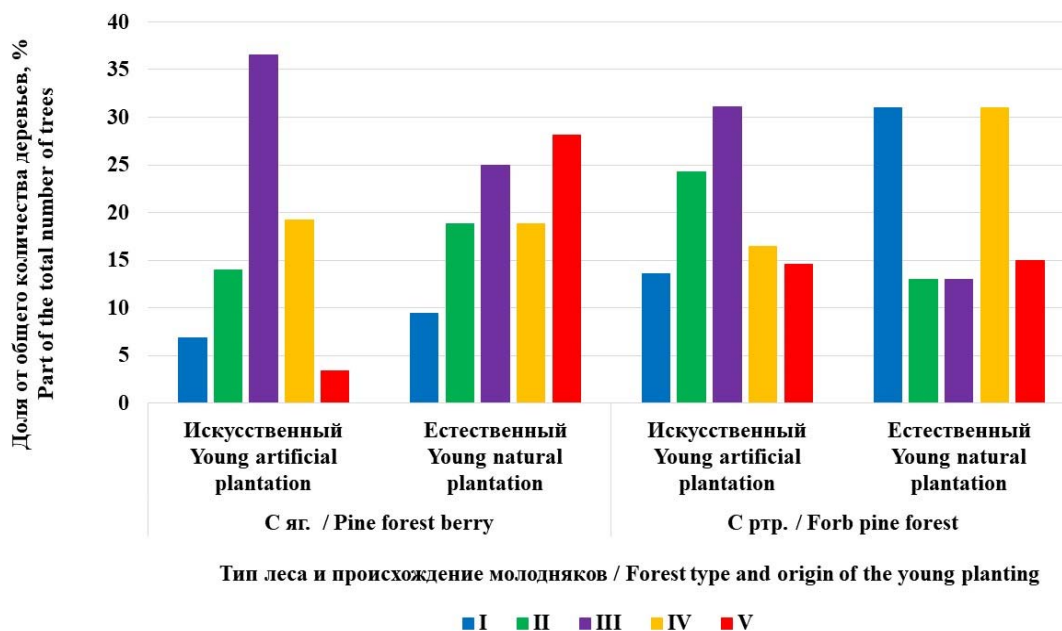


Рисунок 3. Распределение деревьев в молодняках сосны на вырубках (I...V – ранговые классы по высоте ствола)
Figure 3. Distribution of trees in young pine forests in clearings (I...V - rank classes according to the height of the trunk)

Источник: собственные вычисления автора
Source: the author's composition

Биометрические параметры и показатели изменчивости (рис. 4, табл. 3) показывают, что при распределении по ранговым классам высоты обеспечивается значительное различие биометрических показателей и снижение уровня их изменчивости. По диаметру на середине высоты в искусственных молодняках уровень изменчивости, в основном, характеризуется как средний. В естественных молодняках уровень изменчивости, в основном, характеризовался от повышенного до высокого. По высоте ствола при распределении по классам высоты уровень изменчивости в искусственных молодняках оказался практически во всех случаях очень низким. В естественных молодняках уровень изменчивости преимущественно характеризовался как очень низкий.

В искусственных молодняках по классам высоты ствола отмечался, в основном, повышенный, а

в естественных – очень высокий уровень изменчивости по объему ствола в коре, хотя в некоторых случаях он снижался до среднего. Таким образом, как и в случае с основными биометрическими показателями, при распределении по классам высоты удалось добиться снижения вариабельности показателей объема ствола в коре. Однако в естественных молодняках все равно сохраняется очень высокий уровень изменчивости по объему ствола в коре. Объясняется это, на наш взгляд, влиянием возрастного фактора в естественных молодняках. Вероятно, в естественных молодняках следует в дальнейшем использовать распределение деревьев по условным или естественным ступеням распределения. Кроме того, необходимо, на наш взгляд, более подробно изучить параметры объемов маломерных деревьев и содержания коры для данных условий.

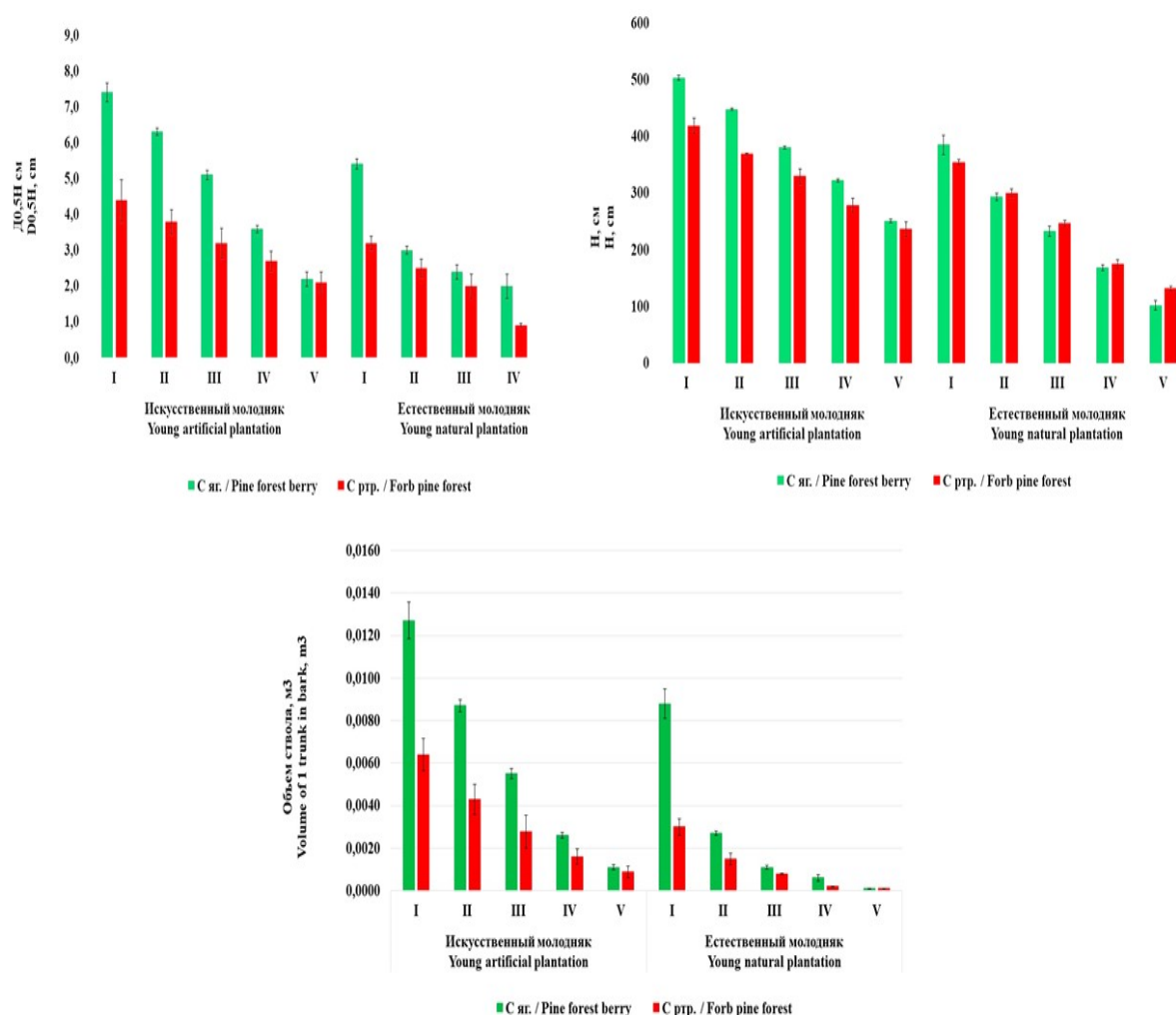


Рисунок 4. Биометрические характеристики деревьев сосны в молодняках по классам роста в высоту на момент учета (I...V – ранговые классы роста в высоту; а – диаметр на середине высоты; б – высота ствола; в – объем ствола)

Figure 4. Biometric characteristics of pine trees in young stands by height growth classes at the time of registration (I...V – height rank classes а – diameter at mid-height; б – height; в – trunk volume)

Источник: собственные вычисления автора
Source: the author's composition

Как в искусственных, так и в естественных молодняках основная часть (86,3-97,5 %) запаса древесины в коре приходится на деревья I-III классов высоты. Однако, в искусственном молодняке С яг. существенную роль в общем запасе древесины играют также деревья IV класса роста. Следует

также отметить, что в С ртр. искусственные и естественные молодняки имели практически одинаковый запас древесины, что свидетельствует также о формировании молодняка сосны естественно-искусственного происхождения.

Таблица 3

Table 3

Показатели варьирования биометрических показателей деревьев по классам роста
Indicators of variation of biometric parameters of trees by growth classes

Класс по вы- соте Height class	Коэффициент вариации (V), % Coefficient of variation (V)					
	С яг. Pine forest berry			С ртр. Forb pine forest		
	по D _{0,5H} by D _{0,5H}	по H by H	по объему ствола by trunk volume	по D _{0,5H} by D _{0,5H}	по H by H	по объему ствола в коре by trunk vol- ume in bark
Искусственный молодняк Young artificial plantation						
I	11,50	4,95	23,05	11,20	3,29	27,63
II	13,43	4,18	28,44	8,85	3,76	19,68
III	16,08	4,88	35,60	12,91	4,09	27,70
IV	12,26	5,99	29,36	10,56	4,63	21,95
V	14,83	10,10	28,25	13,75	5,46	30,57
Естественный молодняк Young natural plantation						
I	3,21	7,82	13,46	20,34	4,55	43,94
II	23,21	4,63	30,64	22,70	5,24	41,39
III	23,39	10,42	33,61	38,11	4,65	57,29
IV	41,75	11,07	52,21	17,23	13,45	40,28
V	22,27	22,63	37,59	35,54	7,02	51,75

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's composition

Таблица 4

Table 4

Средние объемы стволов и запасы древесины сосны по классам высоты
Average volumes of trunks and stocks of pine wood by height classes

Класс по высоте Height class	Общий запас древесины стволов в коре, м ³ The total stock of wood trunks in the bark, m ³			
	Искусственный молодняк Young artificial plantation		Естественный молодняк Young natural plantation	
	С яг	С ртр.	С яг	С ртр.
I	2,80	1,15	0,88	2,97
II	9,12	1,30	0,37	0,63
III	6,27	1,08	0,31	0,35
IV	1,59	0,35	0,12	0,12
V	0,10	0,18	0,04	0,02
Всего Total	19,88	4,09	1,72	4,05

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's composition

Природопользование

На исследованных ПП, помимо естественного возобновления сосны, представлено также возобновление других древесных пород (табл. 5). Основная часть сопутствующего естественного возобновления, помимо сосны, на обеих ПП представлена, главным образом, березой.

На ПП С яг. численность и запас березы, а кроме того, осины, незначителен по сравнению с сосной искусственного и естественного происхож-

дения и не представляет для нее особой конкуренции. Остальные древесные виды сопутствующего возобновления на ПП С яг. ни по количеству, ни по запасу не представляют серьезной конкуренции. Возобновление лиственницы, хоть и в незначительном количестве, можно считать положительным фактором при формировании хвойных насаждений.

Таблица 5
Table 5

Характеристики естественного возобновления других древесных пород на ПП
Characteristics of the natural renewal of other tree species on SP

Древесная порода Tree species	Количество, тыс. шт на 1 га Quantity, thousand pieces per 1 ha	Показатель, (M ± m)		Запас древесины в коре, м ³ Stock of timber in bark, m ³
		Д _{0,5H} , см D _{0.5H} , cm	H, см H, cm	
С яг. Pine forest berry				
Лиственница Larch	0,07	2,0 ± 0,35	300,4 ± 17,95	0,06
Береза Birch	1,78	1,1 ± 0,09	202,3 ± 14,89	0,83
Осина Aspen	0,74	1,4 ± 0,14	232,8 ± 21,75	0,42
Липа Linden	0,13	1,4 ± 0,53	232,5 ± 14,98	0,13
Ива Willow	0,07	0,7 ± 0,10	150,0 ± 10,50	0,01
Всего Total	2,79	-	-	1,45
С ртр. Forb pine forest				
Береза Birch	5,40	1,1 ± 0,09	345,2 ± 21,21	9,58
Осина Aspen	0,25	0,9 ± 0,20	216,7 ± 95,80	0,04
Липа Linden	0,33	2,3 ± 0,25	222,5 ± 8,12	0,42
Ива Willow	0,33	1,2 ± 0,17	155,1 ± 34,1	0,10
Всего Total	6,31	-	-	10,14

Источник: собственные вычисления автора

Source: the author's composition

В свою очередь, на ПП С ртр. численность березы сопоставима с общей численностью сосны искусственного и естественного происхождения. По запасу береза на ПП С ртр. заметно превосходит общий суммарный запас сосны искусственного и естественного происхождения. В сочетании с численностью и запасом древесины других лиственных древесных пород, в данном случае возникает серьезная конкуренция произрастанию сосны. В последующем, без проведения соответствующих лесохозяйственных мероприятий, возникает угроза формирования лиственно-хвойных (естественно-искусственного происхождения) насаждений с заметным угнетением сосны.

Выводы

1. При создании лесных культур сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в результате ее сопутствующего естественного возобновления на вырубках в типе леса С яг. происходит формирование сосняка искусственно-естественного происхождения. На вырубках в типе леса С ртр. в результате интенсивного естественного возобновления сосны формируется сосняк естественно-искусственного происхождения.

2. Процессы естественного возобновления сосны в междурядьях культур С яг. и С ртр. продолжаются в течение не менее 5 лет. По биологическому возрасту дерева сосны естественного возобновления на 5-7 лет моложе деревьев, высаженных в лесных культурах.

3. По средним показателям диаметра на середине высоты, высоты и объема ствола дерева сосны искусственного происхождения в типе леса С яг. существенно превосходят деревья искусственного происхождения в типе леса С ртр. Деревья искусственного происхождения существенно превосходят по величине диаметра на середине высоты, высоте и объему ствола дерева естественного происхождения как в С яг., так и в С ртр.

4. Независимо от происхождения, как в С яг., так и в С ртр., молодняки сосны по диаметру на середине высоты и высоте в целом характеризуются распределением, близким к нормальному. По показателям асимметрии распределения по объему ствола дерева сосны, независимо от происхождения, в молодняках как С яг., так С ртр. отличаются

левосторонней асимметрией, также имеют показатели, близкие к нормальному. По показателям эксцесса распределения по объему ствола искусственный молодняк С яг. имеет показатели, близкие к нормальному, а в С ртр. отличается определенной плосковершинностью. По показателям эксцесса распределения по объему ствола молодняки естественного происхождения как в типе леса С яг., так и в типе леса С ртр. отличаются островершинностью.

5. При распределении молодняков по классам высоты обеспечивается значительное снижение уровня изменчивости по диаметру на середине высоты и, в особенности, по высоте ствола. В искусственных молодняках С яг. и С ртр. при распределении по классам высоты ствола достигается значительное снижение уровня изменчивости по объему ствола в коре. В естественных сохраняется очень высокий уровень изменчивости по объему ствола в коре, хотя отмечается некоторое его снижение.

6. Как в искусственных, так и в естественных молодняках, как С яг., так и С ртр, основную часть (86,3-97,5 %) запаса древесины в коре обеспечивают деревья I-III классов высоты. В С ртр. искусственные и естественные молодняки имели практически одинаковые величины запаса, что дополнительно подтверждает формирование молодняк сосны естественно-искусственного происхождения.

7. Основная часть сопутствующего естественного возобновления в молодняках С яг. и С ртр. представлена березой и, значительно меньше, осинкой, липой и другими породами.

8. В условиях С яг. численность и запас древесины лиственных незначителен и не конкурирует с сосной искусственного и естественного происхождения.

9. В условиях С ртр. численность березы сопоставима с общей численностью сосны искусственного и естественного происхождения, а по запасу древесины береза заметно превосходит общий суммарный запас сосны искусственного и естественного происхождения. Интенсивное возобновление березы создает серьезную конкуренцию сосне и обеспечивает в дальнейшем формирование лиственно-хвойных насаждений.

Список литературы

1. Естественное возобновление хвойных пород на площадях лесных культур / Нгуен Ван Зинь, А.А. Грязькин, Н.В. Беляева, Фан Тхань Лам, А.Г. Шахов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2019. – Вып. 223. – С. 6–15. – DOI: 10.21266/2079-4304.2018.223.6-15.
2. Естественная смена ели сосной на участках лесных культур / А. В. Грязькин, Н. В. Беляева, А. Г. Шахов, Нгуен Ван Зинь // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9. – № 1 (33). – С. 54–61. – DOI: 10.12737/article_5c92016d261c92.18894516.
3. Growth and structure of pre-mature stands of Scots pine created by direct seeding in the boreal zone / A. Pintsev, D. Soldatova, A. Bogdanov, S. Koptev, S. Tretyakov // Journal of Forest Science. 2021 (1). 67: 21-35. DOI: <https://doi.org/10.17221/70/2020-JFS>.
4. 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. – URL: <https://elibrary.ru/dnrpeo>.
5. Гусакова, И. В. Продуктивность и санитарное состояние искусственных сосняков в сухой степи / И. В. Гусакова, М. А. Савин // Вестник молодежной науки Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1. – С. 29–33. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46467197>.
6. Солдатова, Д. Н. Рост и продуктивность лесных культур сосны С.В. Алексеева на Европейском Севере России / Д. И. Солдатова, А. С. Ильинцев // ИВУЗ Лесной журнал. – 2020. – № 1. – С. 99–112. – DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-1-99-112>.
7. Дубенок, Н. Н. Рост и продуктивность сосново-липовых культур в Лесной опытной даче Тимирязевской академии / Н. Н. Дубенок, В. В. Кузьмичев, А. В. Лебедев // Лесохозяйственная информация. – 2021. – № 1. – С. 40–48. – DOI: <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.1.03>.
8. Собачкин, Д. С. Особенности роста и продуктивности сосновых молодняков, сформированных из деревьев различного ценоотического статуса / Д. С. Собачкин, Р. С. Собачкин, А. Е. Петренко // Сибирский лесной журнал. – 2022. – № 3. – С. 34–39. – DOI: 10.15372/SJF20220304.
9. 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. – P. 466. DOI: 10.46490/BF466.
10. 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.
11. 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, 200, Vol. 37, Iss. 1, pp. 14-22. DOI: 10.1080/02827581.2021.2005133.
12. Tenhoviirta S.A.M., Kohl L., Koskinen M., Patama M. [et al.] Solar radiation drives methane emissions from the shoots of Scots pine // New Phytologist, 2022, Vol. 235, Iss. 1, pp. 66-72. DOI: 10.1111/nph.18120.
13. Bilgili E., Ozturk M., Coskuner K.F., Baysal I. [et al.] Quantifying the effect of pine mistletoe on the growth of Scots pine // Forest Pathology, 2018, Vol. 48, Iss. 4, e12435. DOI: 10.1111/efp.12435.
14. Демаков, Ю. П. Закономерности изменения рангового положения деревьев по их размерам в ценопопуляциях сосны обыкновенной / Ю. П. Демаков, Т. В. Нуреева // Лесоведение. – 2019. – № 4. – С. 274–285. – Библиогр.: 284-285 (53 назв.). DOI: 10.1134/S0024114819030021.
15. Усманов, Р. Р. Статистическая обработка данных агрономических исследований в программе «STATISTICA» / Р. Р. Усманов. – Москва, 2020. – DOI: 10/34677/2020.004. – URL: <https://elibrary.ru/bfmxhn>.
16. Aleksandrowicz-Trzińska M., Drozdowski Ż., Studnicki M., Żubura H. Effect of site preparation methods on the establishment and natural regeneration traits of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Northeastern Poland // Forests. 2018. Vol. 9(11), 717. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9110717>.

17. Aleksandrowicz-Trzińska M., Studnicki M., Sikora K., Mariusz R. Communities of mycorrhizal fungi among seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growing on a clearcut in microsites generated by different site-preparation methods of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in South-Eastern Poland. *Forests*. 2022. 13(2). 353. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020353>.

18. 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.

19. 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. DOI: <https://doi.org/10.37279/2914-4738-2021-27-23-35>. – <https://elibrary.ru/hlfzmv>.

20. Trouillier M., van der Maten-Theunissen M., Scharnweber T., Wilmking M. A unifying concept for growth trends of trees and forests the "Potential natural forest" // *Frontiers in Forests and Global Change* 3. September 2020, Vol. 3, Article 581333: 12. DOI:10.3389/ffgc.2020.581334.

21. Ng'andwe Ph., Chungu D., Yambaymba A.M., Chilamambe A. Modeling the height-diameter relationship of planed *Pinus Kesia* in Zambia // *Forest Ecology and Management*. 2019; 447: 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.051>.

References

1. Nguen Van Dinh, Gryazkin A. V., Belyeva N. V., Phan Thanh Lam, Shakhov A G. *Estestvennoe vozobnovlenie khvojnykh porod na ploshchadyakh lesnykh kul'tur* // [Natural regeneration of conifers on the area of forest plantation] *Izvestia Sanct-Peterbgskoi Lesotekhnicheskoi Akademii* [Izvestia Sanct-Peterbgskoi Lesotekhnicheskoi Akademii]. 2019. Vol. 223. pp. 6-15 (In Russian).

2. Gryaz'kin A. V., Belyaeva N. V., Shakhov A. G., Nguen Van Zin' *Estestvennaya smena eli sosnoy na uchastkakh les-nykh kul'tur* [Natural replacement of spruce by pine in forest plantations] // *Lesotekhnicheskiiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal]. 2019. Vol. 9. № 1 (33). pp. 54-61. DOI:10.12737/article_5c92016d261c92.18894516 (In Russian).

3. 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>.

4. Morozov A. E., Yuzhakov V. N. *Formirovanie estestvennykh i iskusstvennykh molodnyakov na sploshnykh vyrubkakh* [Formation of natural and artificial young stands in clear-cut areas]. *Molodoy uchenyj. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal. Ekologiya* [Young scientist. International scientific journal. Ecology]. 2022. № 5(400) pp. 296-298. URL: <http://mmotuch.ruy/archive/400/88541> (In Russian).

5. Gusakova I. V., Savin M. A. *Produktivnost' i sanitarnoe sostoyanie iskusstvennykh sosnyakov v sukhoj stepi* // *Vestnik molodezhnoj nauki Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Youth Science of the Altai State Agrarian University]. 2021, 1: 29-33.

6. Soldatova D. I., Ilintsev A. S. *Rost i produktivnost' lesnykh kul'tur sosny S.V. Alekseeva na Evropeyskom Severe Rossii* [Growth and productivity of pine forest crops named after C.V. Alekseev in the European North of Russia] // *IVUZ Lesnoy zhurnal* [Publishing house of higher educational institutions. Forest journal]. 2020, № 2, pp. 99-112 (In Russian).

7. Dubenok N. N., Kuz'michev V. V., Lebedev A. V. *Rost i produktivnost' sosnovo-lipovykh kul'tur v Lesnoy opytной 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).

8. 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).

9. 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.

10. Dlugosiewicz J., Zajac 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.

11. 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, 200, Vol. 37, Iss. 1, pp. 14-22. DOI: 10.1080/02827581.2021.2005133.

12. Tenhoviirta S. A. M., Kohl L., Koskinen M., Patama M. [et al.] Solar radiation drives methane emissions from the shoots of Scots pine // New Phytologist, 2022, Vol. 235, Iss. 1, pp. 66-72. DOI: 10.1111/nph.18120.

13. Bilgili E., Ozturk M., Coskuner K. F., Baysal I. [et al.] Quantifying the effect of pine mistletoe on the growth of Scots pine // Forest Pathology, 2018, Vol. 48, iss. 4, e12435. DOI: 10.1111/efp.12435.

14. Demakov Yu. P., Nureeva T. V. *Zakonomernosti izmeneniya rangovogo polozheniya derev'ev po ix razmeram v cenopopulyaciyax sosny` obyknovЕННОj* [Features of evolution of a tree size rank in coenopopulations of Scots pine // Lesovedenie [Forestry]. 2019; 4: 274-285. DOI: 10.1134/S0024114819030021 (In Russian).

15. Usmanov R.R. *Statisticheskaya obrabotka dannyh agronomicheskikh issledovaniy 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.

16. Aleksandrowicz-Trzińska M., Drozdowski Ż., Studnicki M., Żubura H. Effect of site preparation methods on the establishment and natural regeneration traits of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Northeastern Poland. Forests. 2018. Vol. 9(11): 717. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9110717>.

17. Aleksandrowicz-Trzińska M., Studnicki M., Sikora K., Mariusz R. Communities of mycorrhizal fungi among seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growing on a clearcut in microsites generated by different site-preparation methods of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in South-Eastern Poland. Forests. 2022. 13(2): 353. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020353>.

18. 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.

19. Saltykov A.I. *Vsplesk estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovЕННОj (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]*. Iss. 27: pp. 23-35 (In Russian).

20. Trouillier M., van der Maten-Theunissen M., Scharnweber T., Wilmking M. A unifying concept for growth trends of trees and forests the "Potential natural forest" // Frontiers in Forests and Global Change 3. September 2020, Vol. 3, Article 581333: 12. DOI:10.3389/ffgc.2020.581334.

21. Ng'ande Ph., Chungu D., Yambaymba A.M., Chilamambe A. Modeling the height-diameter relationship of planed *Pinus Kesia* in Zambia // Forest Ecology and Management, 447 (2019): 1-11. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.05.51.

Сведения об авторе

Ермакова Мария Викторовна – доктор с.-х. наук, вед. научный сотрудник, ФГБУН «Ботанический сад УрО РАН», ул. 8 Марта, 202а, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9894-6587>, e-mail: M58_07E@mail.ru.

Information about the author

✉ *Mariya V. Ermakova* – Dr. Sci. (Agric.), Leading researcher of Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, Ekaterinburg, Russian Federation, 394087, 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.2222-7962/2023.2/4>

УДК 630*232.3



Влияние индивидуальной массы семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30-дневное прорастание в 40-ячейковых SideSlit-контейнерах

Артур И. Новиков¹, arthur.novikov@vglta.vrn.ru <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Сергей В. Ребко², rebko@belstu.by <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>

Татьяна П. Новикова¹, novikova_tp.vglta@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Евгений П. Петрищев¹ , petrishchev.vgltu@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>

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

²Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

Прорастание семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) является важным этапом жизненного цикла дерева и определяет последующую продуктивность и выживаемость, в конечном счете влияя на состав растительного сообщества. Всхожесть семян связана с различными биологическими характеристиками семян, включая индивидуальную массу семени. Количество питательных веществ эндосперма, содержащихся в жизнеспособных семенах, может определять энергию, доступную для прорастания. Экспериментальных свидетельств влияния индивидуальной массы семян на прорастание все еще достаточно мало. Для апробации технологии производства посадочного материала с закрытой корневой системой с учетом индивидуальных для каждого сортового семени сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» спектрометрических и морфометрических особенностей три случайных набора по 400 обескрыленных семян ($N = 1200$) высеяли вручную в 40-ячейковые SideSlit-контейнеры автоматизированного лесного питомника. Для проверки гипотезы о влиянии индивидуальной массы семени сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на показатели его прорастания в SideSlit-контейнерах на 30-й день использовали однофакторный дисперсионный анализ с проверкой однородности по критерию Ливиня и апостериорным LSD-тестом средних. Размах индивидуальной массы высеянных семян варьировал от 1,0 до 13,3 мг ($m \pm SD \mid 60.1 \pm 17.5$ мг). Средние значения показателя прорастания семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30 день в объеме 6, 8, 12, 16, 18, 26 SideSlit-контейнеров статистически (критерий однородности дисперсий Ливиня 6,35; $p = 1,98e-22$; ANOVA F-критерий 1,291; $p = 0,0139$; апостериорный критерий LSD $p < 0.05$) отличаются от показателя во 2, 7, 10, 11, 13, 19, 22, 24, 26, 27, 29 контейнерах. Средние значения индивидуальной массы проросших на 30-й день в ячейках SideSlit-контейнеров автоматизированного лесного питомника 942 семян статистически (статистика Ливиня 11,317; $p = 0,000792$; ANOVA F-критерий 12,098; $p = 0,000523$) отличаются от средних значений индивидуальной массы непроросших 258 семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская». В будущем будут изучены прорастание семян на 50-й день в SideSlit-контейнерах и комплексные показатели качества полученных сеянцев на 60-й день, включая DQI и RQI.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, сорт «Негорельская», *Pinus sylvestris* L., индивидуальная масса семени, прорастание семян, контейнерный лесной питомник, улучшение семян, качество сеянца, искусственное лесовосстановление

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00228, <https://rscf.ru/project/23-26-00228/>, <https://elibrary.ru/jtyxuh>.

Заявление о доступности данных: данные индивидуальной массы семян, представленные в этом исследовании, находятся в открытом доступе в научном репозитории – [набор данных] Petrishchev, Evgeniy P.; Rabko, Siarhei U.; Novikov, Arthur I.; Novikova, Tatyana P. 2023. Morphometric data of individual seeds (N = 1200) of the Negorelskaya variety *Pinus sylvestris* L. (empirical dataset); Mendeley Data, Version 1, doi: <https://doi.org/10.17632/8g258nbgmf.1>

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние индивидуальной массы семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30-дневное прорастание в 40-ячейковых SideSlit-контейнерах / А. И. Новиков, С. В. Ребко, Т. П. Новикова, Е. П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 59–86. – Библиогр.: с. 72–83 (76 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4>.


Поступила 28.05.2023. *Пересмотрена* 22.06.2023. *Принята* 28.06.2023. *Опубликована онлайн* 18.09.2023.



Article

The effect of the individual seed mass of Negorelskaya variety Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on 30-day germination in 40-cell SideSlit growing containers

Arthur I. Novikov¹, arthur.novikov@vglta.vrn.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Siarhei U. Rabko², rebko@belstu.by  <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>

Tatyana P. Novikova¹, novikova_tp.vglta@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Evgeniy P. Petrishchev¹ , petrishchev.vgltu@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>

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

²Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus

Abstract

The seeds germination of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) is an important stage of the tree's life cycle and determines the subsequent productivity and survival, ultimately affecting the composition of the plant community. Germination is related to various biological characteristics of seeds, including individual seed mass. The amount of endosperm nutrients contained in sound seeds can determine the energy available for germination. Experimental evidence of the influence of individual seed mass on germination is still quite small. To test the technology of planting material production with a closed root system, taking into account the individual spectrometric and morphometric features of the Negorelskaya variety for each varietal seed of the Scots pine (*P. sylvestris* L.), three random sets of 400 de-winged seeds (N = 1200) were sown manually in 40-mesh SideSlit containers of an automated forest nursery. To test the hypothesis about the influence of the individual seed mass of the Scots pine (*P. sylvestris* L.) varieties "Negorelskaya" on the indicators of its germination in SideSlit containers on the 30th day, a single-factor analysis of variance was used with a check of uniformity according to the Levene's criterion and a posteriori LSD test of averages. The individual mass of the sown seeds varied from 1.0 to 13.3 mg ($m \pm SD$ | 60.1 ± 17.5 mg). The average values of the germination index of the seeds of Negorelskaya variety Scots pine (*P. sylvestris* L.) on day 30 in the volume of 6,8,12,16,18,26 SideSlit containers statistically (Levene's criterion 6.35, $p = 1.98e-22$; ANOVA F-criterion 1.291, $p = 0.0139$; a posteriori criterion LSD $p < 0.05$) differ from the indicator in 2,7,10,11,13,19,22,24,26,27,29 containers. The average values of

the individual mass of 942 seeds germinated on the 30th day in the cells of SideSlit containers of the automated forest nursery statistically (Levene's criterion 11.317; $p = 0.000792$; ANOVA F-criterion 12.098; $p = 0.000523$) differ from the average values of the individual weight of the ungerminated 258 seeds of the Negorelskaya variety Scots pine (*P. sylvestris* L.). In the future, this seed germination on day 50 in SideSlit containers and comprehensive quality indicators of the seedlings, including DQI and RQI, will be studied.

Keywords: Scots pine, *Pinus sylvestris* L., Negorelskaya variety, individual seed mass, seed spectrometric features, seed germination, container-grown forest nursery, seed enhancement, seedling quality, artificial reforestation

Funding: this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-26-00228, <https://rscf.ru/project/23-26-00228/>, <https://elibrary.ru/jtyxux>.

Data Availability Statement: the individual seed mass data presented in this study are openly available in [dataset] Petrishchev, Evgeniy P.; Rabko, Siarhei U.; Novikov, Arthur; Novikova, Tatyana P. 2023. Morphometric data of individual seeds ($N = 1200$) of the Negorelskaya variety *Pinus sylvestris* L. (empirical dataset); Mendeley Data, Version 1, doi: <https://doi.org/10.17632/8g258nbgmf.1>

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

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

For citation: Novikov A. I., Rebko S. V., Novikova T. P., Petrishchev E. P. (2023). The effect of the individual seed mass of "Negorelskaya" variety Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) on 30-day germination in 40-cell SideSlit growing containers. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 59-86 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/4>.

Received 28.05.2023. *Revised* 22.06.2023. *Accepted* 28.06.2023. *Published online* 18.09.2023.

Введение

При производстве высококачественного посадочного материала, в том числе и для адаптивного восстановления лесных ландшафтов [24; 46; 72], необходимо учитывать селекционные способы создания новых перспективных гибридов [13] одного из основных лесобразующих видов – сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), используемого в технологии лесовосстановления [17; 25; 26].

Целесообразность проведения данного исследования в рамках научного гранта [8] обусловлена стремлением проследить прорастание и ранний рост каждой индивидуальной культуры ($N = 1\ 200$) сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская», начиная непосредственно от семени и учитывая его количественные и качественные показатели, набирая банк данных, начиная от результатов изучения спектрометрических и морфометрических свойств индивидуального семени до оценки биометрических параметров онтогенетического развития из

него семени в природно-производственных условиях произрастания.

Основные международные научные группы, длительное время плодотворно исследующие качественные (спектрометрические) показатели лесных и сельскохозяйственных семян, возглавляют:

– профессор Мулялем Тигабу (Sveriges Lantbruks Universitet, SLU, Swedish University of Agricultural Sciences, Southern Swedish Forest Research Centre) [73];

– профессор Кюю-Сак Кэнг (Forest Genetics & Tree Breeding Lab., Department of Forest Sciences, College of Agriculture and Life Sciences (CALs), Seoul National University) [43; 62];

– профессор Клиссия Магранджело (University of São Paulo (USP) Center for Nuclear Energy in Agriculture (CENA) [18; 32; 63].

Интерес к неразрушающей оценке качества и детектированию семян биофизическими методами [1; 6; 55] неуклонно возрастает, увеличивая географию и число участников. Все группы ученых имеют

профессиональную приборную базу, необходимый и достаточный опыт исследования спектрометрических показателей семян в видимой, инфракрасной и R-областях. Используются методики с применением классических VIS, инфракрасных спектрометров, обратных Фурье-спектрометров, TDS-спектрометров, R-детекторов, а также перспективные методики с применением конволюционных нейросетей [21].

Однако все методики, используемые в этих исследованиях, отличаются друг от друга и не в полной мере учитывают биофизические особенности лесных семян. При этом во многих методиках жизнеспособность семян определяется инвазивным методом. Также зачастую у всех групп исследователей используются стационарные спектрометры с длительной экспозицией, что существенно повышает стоимость проведения исследований. В большинстве случаев исследования спектрометрических показателей лесных семян проводятся отдельно [39], без логического продолжения в виде определения всхожести и наблюдений за ростом и развитием сеянцев. И наоборот, исследование роста и развития сеянцев из семян разного цвета проводится без привязки к тем или иным спектрометрическим показателям индивидуального семени.

В связи с этим возникает задача разработки нового универсального подхода [12] применения инноваций в лесном хозяйстве [4], обеспечивающего возможность решения проблемы получения высококачественных семян для выращивания улучшенного репродуктивного материала сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» и обладающего следующими преимуществами:

а) использованием неинвазивных воздействий [16; 65] на семена;

б) использованием нежестких (без применения UV, X-ray [42; 56; 75]) источников света [35; 37; 53], в основном видимого (VIS) или ближнего инфракрасного [29; 75; 76] (NIR) диапазонов [9];

в) учетом бимодальных, биофизических и биохимических особенностей лесных семян и полученных из них сеянцев в полевых условиях и условиях контейнерного питомника;

г) исследованием корреляционной связи «спектрометрические параметры семени – биометрические особенности сеянца»;

д) накоплением набора данных (датасета) о свойствах каждого единичного семени с последующей привязкой данных о биометрических параметрах полученного из него сеянца;

е) принципиальной возможностью априорного оптимального прогнозирования темпов роста сеянцев по спектрометрическим показателям семян исходя из установленного для конкретного вида сеянцев максимума индекса качества Диксона.

Несомненно, заслуживает акцента то обстоятельство, что ученые-лесоводы неуклонно находятся в поиске лучшей методики оценки качества контейнерных сеянцев семейства сосновых (*Pinaceae*) по распределению диаметра корневой шейки и высоты сеянцев [22], и в особенности на основании комплексных показателей [2].

Процессом, имеющим благодаря исследованиям достаточную статистическую значимость и корреляционную связь (от умеренной до тесной) с физиологическим качеством семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), а равно и с последовательностью технологического воздействия для улучшения семян перед высевом, в процессе посева на автоматизированной линии и после посева в автоматическом режиме поддержания уровня температуры и влаги теплицы контейнерного питомника, является прорастание семян.

По мнению Дэвида Б. Саутха и С.А. Энебака (2006)⁴, «использование семян с высоким процентом всхожести является ключевым фактором». Время и деньги на производственную деятельность контейнерного питомника [3], вложенные в автоматизированную подготовку семенного ложа (почвы, субстрата) в каждой ячейке кассеты, автоматический посев семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), будут потрачены впустую, если семя не прорастет или сеянец погибнет после прорастания.

Масса семени является одним из наиболее важных биологических признаков и влияет на различные уровни прорастания семян, поскольку, как определяют А. Аннивайер и соавторы (2020), «количество крахмала и питательных веществ эндосперма,

⁴ South, D. B. Integrated pest management practices in southern pine nurseries / D. B. South, S. A. Enebak // New Forests. – 2006. – Vol. 31. – № 2. – P. 253–271. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-005-6571-0>.

содержащихся в семенах, может определять энергию и питательные вещества, доступные для прорастания семян» [14]. Результаты исследований П. Пржибульского и соавторов (2020) семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) подтверждают ожидаемую корреляцию между массой семян и размером зародыша [66].

Англо-русский словарь Линнарда⁵ достаточно четко определяет разницу между терминами «seed weight» (натурой семян, определяемой величиной массы семян, занимающей объем в 1 литр, г л⁻¹) и «seed mass» (массой одного семени, мг).

Соответственно, систематический запрос современных научных статей по терму [Scholar Query = "seed weight" OR "seed mass" AND "Scots pine" | Filters: Published Date = (2018-01-01 - 2023-06-01)] (lens.org) возвращает 15 источников, согласно рис. 1, свидетельствующих об изучении параметра массы семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) относительно следующего:

- перераспределения массы 1000 семян относительно изменения климата у Е.И. Парфеновой и соавторов [61];

- оценки фенотипической пластичности насаждений сосны обыкновенной в Шотландии по морфометрии шишек и семян в долгосрочном многосайтовом эксперименте Д. Битон и соавторов [19];

- связи ризосферы с надземной биомассой, несмотря на высокую вариабельность признаков семян и сеянцев, у К. Кармоны и соавторов (2021) [28];

- влиянии эффекта снегования на прорастание семян с различной массой 100 семян у А. Аннивайер и соавторов (2020) [14];

- дифференциации массы 1000 семян (1000-seed weights) сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) от происхождения у П. Пржибульского и соавторов (2020) [66];

- исследований регуляторов роста-гибберелинов, у С. Бокштетте и соавторов [23];

- оценки влияния тяжелых металлов на всхожесть и относительную массу семян у Дж. Тао Фу и соавторов (2019) [34].

⁵ Linnard, W. Russian-English, English-Russian forestry and wood dictionary / W. Linnard, D. Darrah-Morgan. – New Work : CAB International Publishing, 1999. – 180 p.

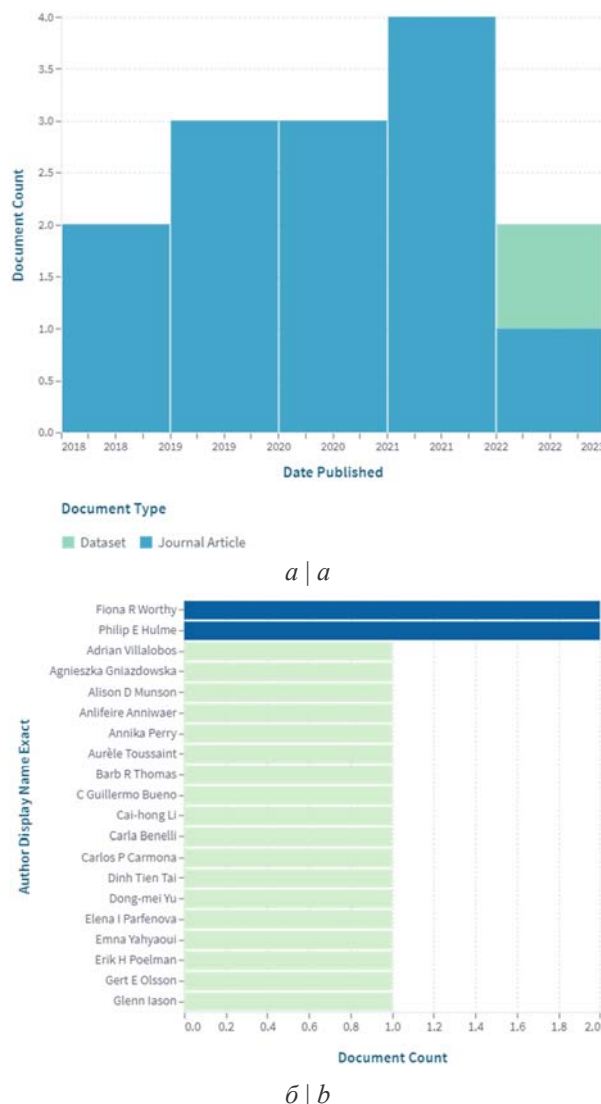


Рисунок 1. Пятилетнее распределение научных публикаций (N = 14) по видам (а) и авторам (б); терм [Scholar Query = "seed weight" OR "seed mass" AND "Scots pine" | Filters: Published Date = (2018-01-01 - 2023-06-01)]

Figure 1. Five-year distribution of scientific publications (N = 14) by type (a) and scientists (b); [Scholar Query = "seed weight" OR "seed mass" AND "Scots pine" | Filters: Published Date = (2018-01-01 - 2023-06-01)] term

Источник: <https://www.lens.org/>, компоновка по запросу авторов

Source: <https://www.lens.org/>, layout at the authors' request

Подготовка семян перед высевом может включать определенное технологическое воздействие [58] – механическую или термическую скарификацию [40; 47], капсулирование [40], дражирование [40], протравливание [71], сепарацию по

спектрометрическим свойствам [10]. В процессе прорастания семян на проростки и, в последующем, сеянцы, оказывается технологическое воздействие со стороны семенного ложа (seed bed), характеризующее конструктивными особенностями и объемом контейнера [38; 68; 69] и используемым субстратом и мульчей [27; 47; 49], степенью их уплотнения [44]. Более того, различное технологическое воздействие на будущий лесной посадочный материал при выращивании в автоматизированном питомнике может быть дифференцировано: по источникам света [31; 54; 67], уровню затенения [30; 67; 69] сеянцев, варьированию температуры [15; 45; 50], степени интенсивности полива [33; 41; 54], степени внесения удобрений [49; 52; 71].

Выполнение боковых вертикальных прорезей (Side Slit), расположенных в шахматном порядке на поверхности контейнера в области расположения и формирования ризосистемы сеянца в соответствии с рис. 2, может повысить волокнистость корневой системы и исключить риск образования корневых мостиков между ячейками. Выполнение ячеек в плане квадратного сечения обеспечивают высокую плотность роста и оптимальное использование площади теплицы и склада.

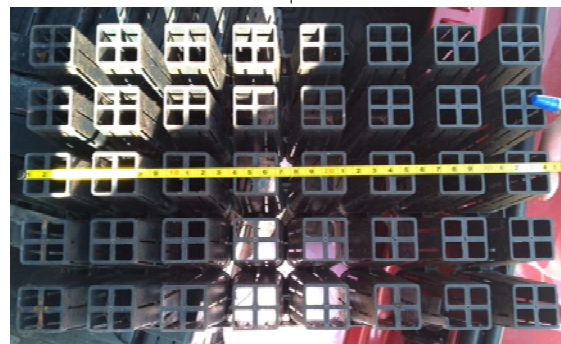
Спектрометрические показатели семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в ряде случаев демонстрируют дифференциацию показателей прорастания [5] в контейнерах и дифференциацию показателей раннего роста сеянцев [57; 59]. Для проверки гипотезы об отсутствии влияния индивидуальной массы семени сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на показатели его прорастания на 30-й день в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника поставили следующие задачи:

1. Оценить степень влияния средней массы семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на показатель прорастания на 30-й день в объеме единичного SideSlit-контейнера.

2. Оценить степень влияния индивидуальной массы семян ($N = 1200$) на прорастание (или его отсутствие) в ячейках SideSlit-контейнеров автоматизированного лесного питомника.



a | a



б | b

Рисунок 2. Конструктивно-технологические особенности SideSlit-контейнера НИКО V-120 (размер ДШГ 352*216*110 мм, объем ячейки 120 см³, 526 сеянцев на кв. м; ВСС АВ, Швеция), используемого в исследовании: виды сверху (а) и снизу (б) для апробации технологии производства посадочного материала с учетом спектрометрических и морфометрических особенностей семян

Figure 2. Design and technological features of the SideSlit-container НИКО V-120 (size DSHG 352*216*110 mm, cell volume 120 cm³, 526 cells per sq. m; BCC AB, Sweden) used in the study: top (a) and bottom (b) views for testing the technology of planting material production taking into account the spectrometric and morphometric features of seeds

Источник: собственная композиция автора Новиковой Т.П. (23.06.2023)

Source: author's own composition by Novikova T.P. (23.06.2023)

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

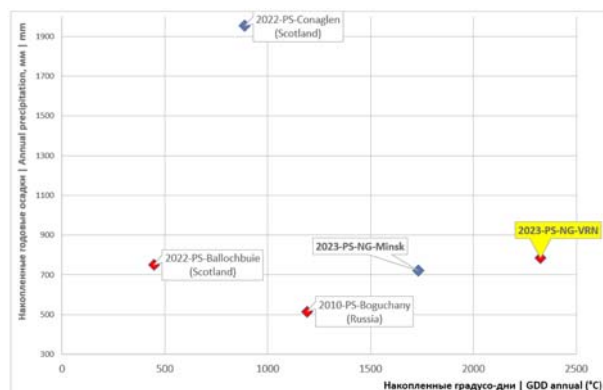
Объект исследований – обескрыленные семена ($N = 1200$) сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» измеренной индивидуальной массы, высеянные в SideSlit-контейнеры автоматизированного лесного питомника.

Предмет исследований – процесс и показатели прорастания на 30-й день семян ($N = 1200$) сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» в SideSlit-контейнерах, апробируемые для интенсификации получения посадочного материала, учитывающего спектрометрические и морфометрические параметры семян.

Дизайн эксперимента

Три набора ($n = 400$) семян отбирали методом квартования из партии обескрыленных семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» урожая 2023 года, собранных в (широта, долгота, высота НУМ). У каждого семени из набора измерили размеры, массу, площадь, объем эллипсоида и спектрометрические параметры по разработанной на основе [21; 23; 48] методике и поместили в прозрачные кармашки под индивидуальным номером.

В настоящее время наблюдается тенденция перемещения [61] семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) для проведения ростовых экспериментов в градиенте функции накопленного годового количества осадков (мм) в зависимости от накопленных градусо-дней [19] региона проведения. П. Пржибульский и соавторы (2020) полагают, что «количество осадков в течение вегетационного периода создает селективное давление, влияющее на генетическую изменчивость сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)» [66], а Дэвид Б. Саутх и соавторы (2023) в подробном обзорном докладе «Почему здоровые саженцы сосны погибают после того, как они покидают питомник» [70] объясняют «некоторое увеличение показателя выживаемости» [70] пересаженных в поле контейнерных сеянцев «увеличением среднего количества осадков» [70]. Текущий эксперимент не является исключением: 1200 сортовых (сорт «Негорельская») семян переместили из района сбора (1731 градусо-дней, 722 мм) в район эксперимента (2326 градусо-дней; 786 мм) согласно рис. 3, а, сориентированному по данным климатических наблюдений 2022 года.



а | а



б | б

Рисунок 3. Климатический градиент (зависимость накопленных осадков от накопленных градусо-дней) (а) перемещения семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.): синий маркер – место происхождения семян; красный маркер – место перемещения семян для исследований; из PS-Conaglen (Scotland) в PS-Ballochbuie (Scotland) у Д. Битон и соавторов (2022) [19], в PS-Boguchany (Russia) у Е.И. Парфеновой и соавторов (2021) [61]

б – перемещение семян из 2023-PS-NG-Minsk в 2023-PS-NG-Voronezh в файлах с прозрачными кармашками в текущем исследовании

Figure 3. Climatic gradient (dependence of annual precipitation on annual degree-days) of the movement (а) of Scots pine (*P. sylvestris* L.) seeds: blue marker – the seeds provenance; red marker – the place of seeds movement for research; from PS-Conaglen (Scotland) in PS-Ballochbuie (Scotland) by D. Beaton et al. (2022) [15], in PS-Boguchany (Russia) by E.I. Parfenova et al. (2021) [47]; б – seed transfers from 2023-PS-NG-Minsk to 2023-PS-NG-Voronezh in files with transparent pockets in the current study

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's own composition

Высев семян осуществляли вручную в каждую из 40 предварительно заполненных торфяным субстратом кислой реакции ячеек объемом 120 см³ контейнеров НИКО V-120 SideSlit (размер ДШГ 352*216*110 мм, 526 сеянцев на кв. м; ВСС АВ, Швеция), помещая семя в центр ячейки на глубину 0,5 см. Расположение семян для последующей идентификации осуществляли в соответствии с рис. 4, а, обозначая начальную ячейку отсчета сна-

ружи специальным маркером как на рис. 4, б. После высева 40 семян контейнер присыпали мульчей в виде перлита и выставляли на поддон для транспортировки каром в теплицу. Каждый набор из 400 семян разместили в 10 контейнерах. Через 30 дней осуществили подсчет всхожести (в процентах) для каждого из 30 контейнеров (N = 1 200 семян) (рис. 4, в) и индивидуальной всхожести каждого семени (0 – не взошло; 1 – взошло).

5	5	6	15	16	25	26	35	36
4	4	7	14	17	24	27	34	37
3	3	8	13	18	23	28	33	38
2	2	9	12	19	22	29	32	39
1	1	10	11	20	21	30	31	40
1	1	2	3	4	5	6	7	8

а



б | б

в | с

Рисунок 4. Ручной высев 1 200 индивидуальных семян (N = 400 * 3 образца) сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» в SideSlit-контейнеры НИКО V-120 (размер ДШГ 352*216*110 мм, 526 сеянцев на кв. м; ВСС АВ, Швеция) для апробации технологии производства посадочного материала с учетом спектрометрических и морфометрических особенностей семян: схема размещения индивидуальных семян в контейнере (а); ручной высев и маркировка SideSlit-контейнеров (б); оценка прорастания семян в SideSlit-контейнерах на 30-й день (в)

Figure 4. Manual sowing of 1,200 individual seeds (N = 400 seeds * 3 samples) of Scots pine (*P. sylvestris* L.) sort "Negorelskaya" in SideSlit-containers НИКО V-120 (size LWH 352*216*110 mm, 526 seedlings per sq. m; BCC AB, Sweden) for testing the production technology planting material, taking into account the spectrometric and morphometric characteristics of seeds: scheme of placement of individual seeds in a container (a); manual seeding and labeling of SideSlit containers (b); evaluation of seed germination in SideSlit-containers on the 30th day (c)

Источник: собственная композиция автора Новиковой Т.П. (22.07.2023)

Source: author's own composition by Novikova T.P. (22.07.2023)

Моментом учета прорастания семян сорта «Негорельская» в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника установили 30-дневный период от ручного высева в каждую из 40 ячеек контейнера, как это реализовано у Mañas et al.⁶ (2009), А.В. Пименова (2015) [11], А.И. Новикова (2019) [5].

Анализ данных

Программный комплекс визуализации статистических данных Graph Pad Prism, версию 8, использовали для оценки всхожести индивидуального семени по массе и групповой всхожести семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» в Sideslit-контейнерах автоматизированного лесного питомника/

Частотная диаграмма (рис. 5) распределения по индивидуальной массе отсутствия (0) и наличия (1) на 30-й день в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника проростков семян (N = 1200) сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская демонстрирует некоторое отклонение от распределения Гаусса.

Использовали однофакторный дисперсионный анализ из модуля «Сравнение средних» программного комплекса для обработки статистических данных SPSS Statistics, версия 25, для оценки степени прорастания на 30-й день в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника в следующих группах семян (N = 1200) сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская:

– по индивидуальной массе согласно табл. А1 прил. А (число групп $m = 89$, визуализация графиком средних на рис. 6);

– в объеме каждого SideSlit-контейнера ($n = 40$) согласно табл. А1 прил. А (число групп $m = 30$, визуализация графиком средних на рис. 7);

– по наборам ($n = 400$) отобранных для исследования семян согласно табл. А1 прил. А (число групп $m = 3$, визуализация графиком средних на рис. 8).

Однофакторный дисперсионный анализ достаточно робастен к отклонениям от нормальности, тем не менее группы (см. прил. А) проверяли на основании критерия Ливиня однородности дисперсий. Межгрупповое сравнение средних осуществляли на основании аспостериорного критерия (LSD) с определением уровня значимости p [67].

Результаты и обсуждение

Распределение массы семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская в объеме SideSlit-контейнеров автоматизированного лесного питомника представлено на рис. 5.

График средних прорастания на 30-й день групп (по индивидуальной массе, табл. А1) семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника представлен на рис. 6.

График средних прорастания на 30-й день групп (по наборам ($n = 400$), отобранным для исследования, табл. А1) семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника представлен на рис. 7.

⁶ Mañas, P. Quality of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) seedlings using waste materials as nursery growing media / P. Mañas, E. Castro, J. De Las Heras // New Forests. – 2009. – Vol. 37. – № 3. – P. 295-311. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-008-9125-4>.

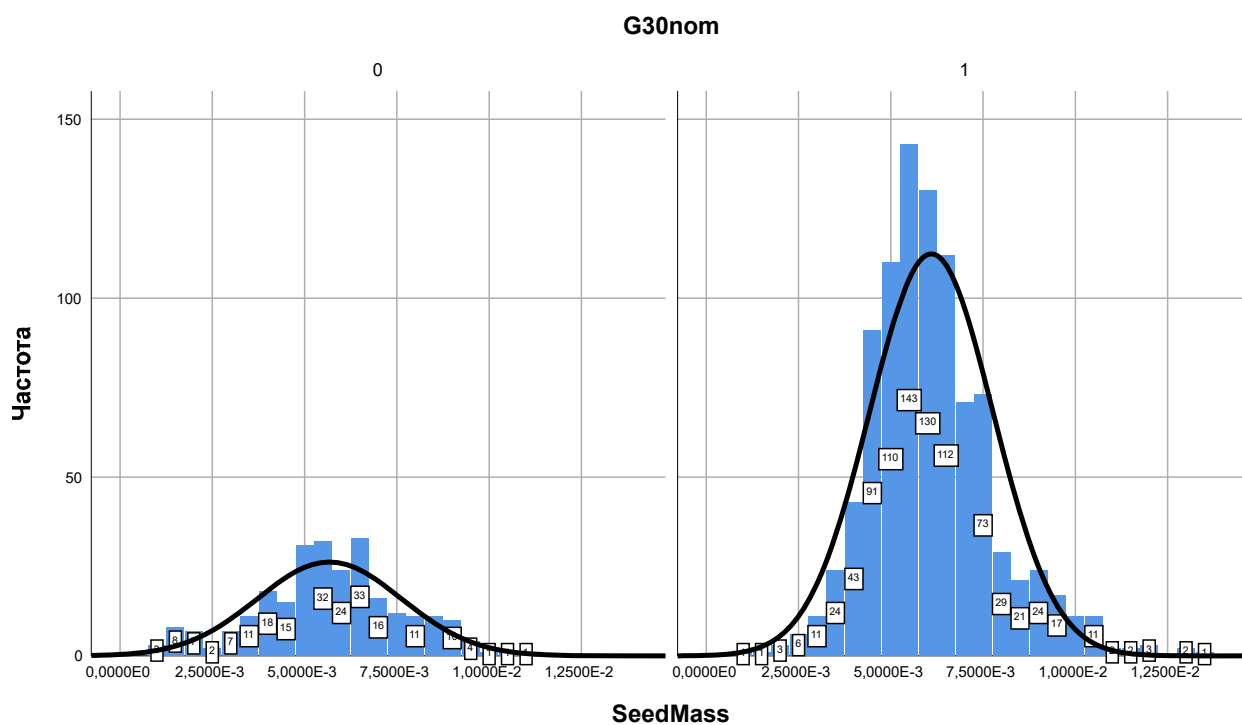


Рисунок 4. Частотная диаграмма распределения по индивидуальной массе отсутствия (0) и наличия (1) на 30-й день в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника проростков семян (N = 1200) сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская. Сплошной черной линией представлена линия нормального распределения

Figure 4. Frequency distribution diagram by individual weight of absence (0) and presence (1) on the 30th day in the SideSlit containers of the automated forest nursery of seed seedlings (N = 1200) of the common pine (*P. sylvestris* L.) of the Negorelskaya variety. A solid black line represents the normal distribution line

Источник: собственная композиция авторов

Source: own composition

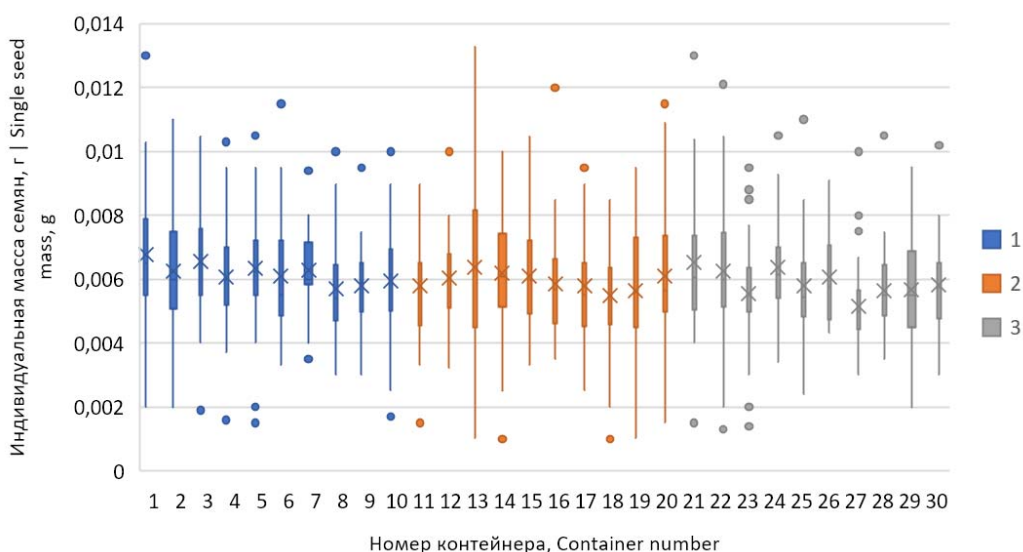


Рисунок 5. Боксплот распределения массы семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская в объеме SideSlit-контейнеров (Container number) автоматизированного лесного питомника. Разным цветом обозначены три набора семян, случайным образом отобранных для исследования

Figure 5. Boxplot of the distribution of the seed mass of Negorelskaya variety Scots pine (*P. sylvestris* L.) in the volume of SideSlit-containers (Container number) of an automated forest nursery. Three sets of seeds randomly selected for research are indicated in different colors

Источник: собственная композиция авторов

Source: own composition

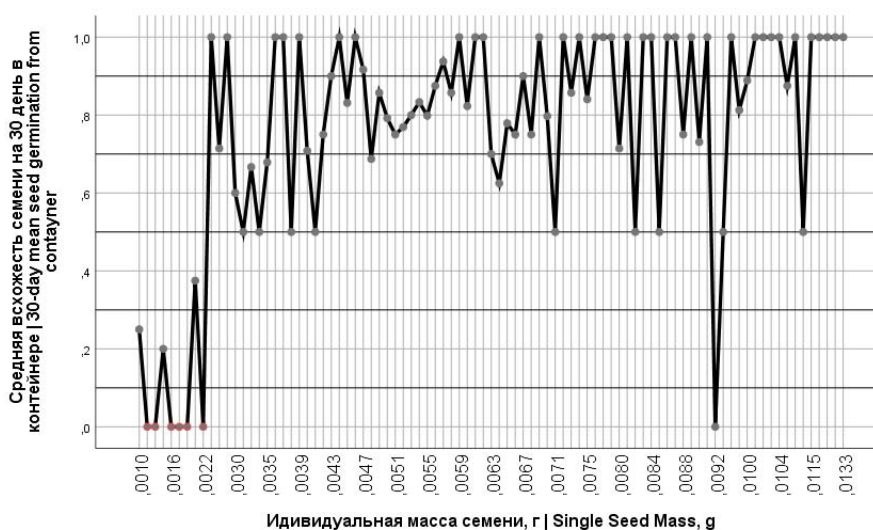
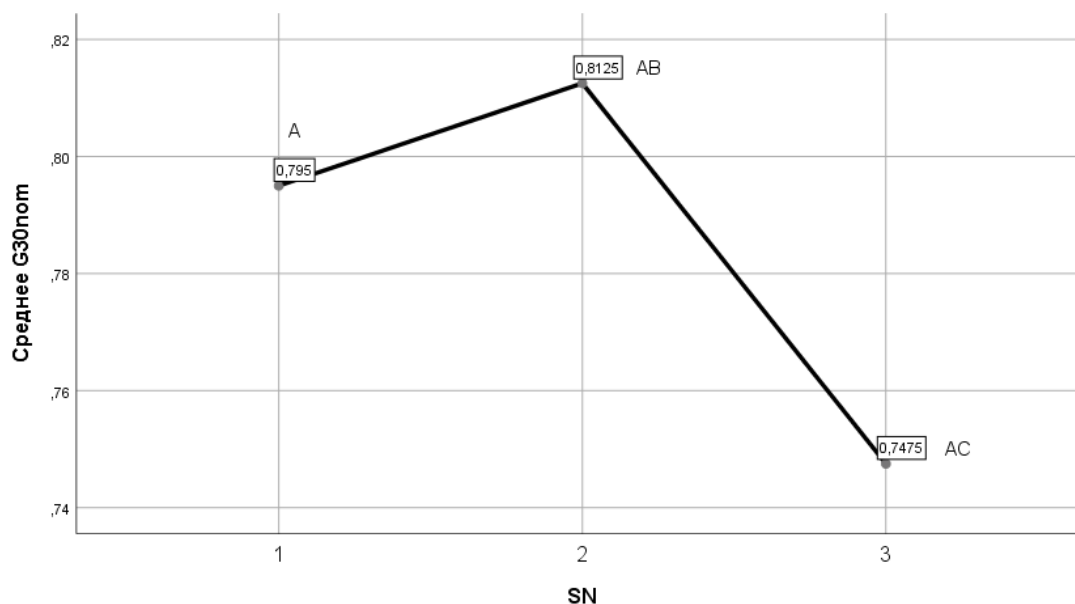


Рисунок 6. График средних прорастания на 30-й день групп (по индивидуальной массе) семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника. Статистика Ливиния 3,925 ($p = 5,24e-22$); F-критерий однофакторного дисперсионного анализа 1.390 ($p = 0,012$)

Figure 6. Average graph of 30-day germination of groups (by single seed mass) seeds of Negorelskaya variety Scots pine (*P. sylvestris* L.) in SideSlit-containers of an automated forest nursery. Levene's statistics 3,925 ($p = 5,24e-22$); ANOVA F-criterion 1.390 ($p = 0,012$)

Источник: собственная композиция авторов

Source: own composition



Значения, обозначенные разными прописными буквами, статистически различаются на основании ($p < 0.05$) апостериорного критерия Т2-Даннета | Values denoted by unequal capital letters differ statistically based on ($p < 0.05$) a posteriori criterion

Рисунок 7. График средних прорастания на 30-й день групп (по наборам ($n = 400$) отобраным для исследования) семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника. Статистика Ливиня 10,323 ($p = 0.000036$); F-критерий однофакторного дисперсионного анализа 2.686 ($p = 0,069$)

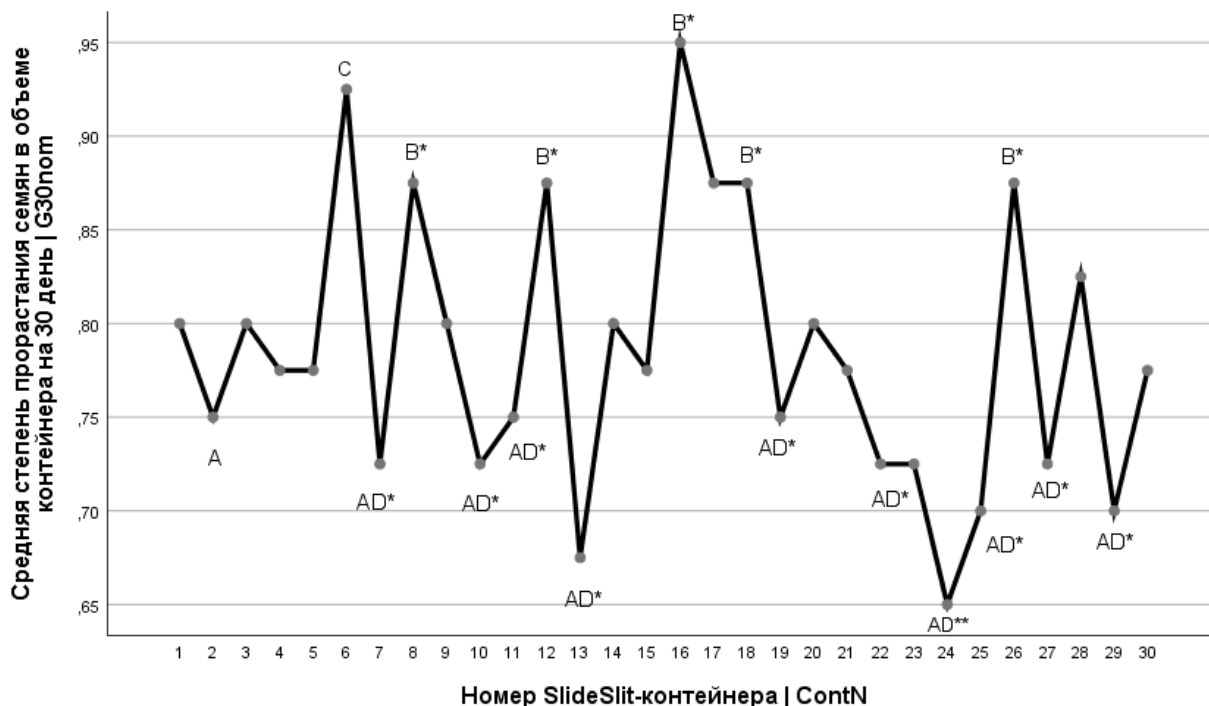
Figure 7. Average graph of 30-day germination of groups (by single seed mass) seeds of Negorelskaya variety Scots pine (*P. sylvestris* L.) in SideSlit-containers of an automated forest nursery. Leven's statistics 10.323 ($p = 0.000036$); ANOVA F-criterion 2.686 ($p = 0.069$)

Источник: собственная композиция авторов

Source: own composition

График средних прорастания на 30-й день групп (в объеме одного контейнера ($n = 40$), табл. А1) семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Него-

рельская в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника представлен на рис. 8.



Переменные, подписанные разными прописными буквами статистически значимо различаются на уровнях * $p = 0.05$; ** $p = 0.01$ по апостериорному тесту НЗР | Variables signed with different capital letters statistically significantly differ at the levels * $p = 0.05$; ** $p = 0.01$ according to the a posteriori test of the of the least significant difference (LSD)

Рисунок 8. График средних прорастания на 30-й день групп (по 40 семян в объеме одного контейнера) семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника. Статистика Левина 6,35 ($p = 1,98e-22$); F-критерий однофакторного дисперсионного анализа 1,291 ($p = 0,0139$)

Figure 8. Average graph of 30-day germination of groups (in the volume of one container ($n = 40$)) seeds of Negorelskaya variety Scots pine (*P. sylvestris* L.) in SideSlit-containers of an automated forest nursery. Leven's statistics 6,35 ($p = 1,98e-22$); ANOVA F-criterion 1,291 ($p = 0,0139$)

Источник: собственная композиция авторов
Source: own composition

Поскольку индивидуальная масса семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) является как генетическим, так и фенотипическим признаком, выбор вида дерева для исследования произведен не случайно. Во первых, “хвойные породы демонстрируют более высокие показатели адаптации к росту деревьев [36]”. Во-вторых, сосна обыкновенная (*P. sylvestris* L.) распространена в “широкой климатической нише [20]”, в которой, согласно данным Джоан Битон и др. (2022), можно обнаружить широкие изменения среднегодовых температур (от 0 °C до +15 °C [19]) и годового объема осадков (от 200 до 3 500 мм [19]). В-третьих, способность деревьев сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в качестве главной породы в смешан-

ных древостоях с березой [51] (*Betula pendula* Roth), буком европейским (*Fagus sylvatica* L.) [64] в условиях изменения климата давать больший прирост, чем в монокультурах, делает эту породу хозяйственно привлекательной для комплексного подхода к восстановлению труднокультивируемых площадей.

В настоящий момент мощность научных исследований по данным Scopus, использующих *Pinus sylvestris* в качестве объекта, составляет более 9 500 опубликованных работ (от минимума в 11 до максимума 1736 в Норвегии) в странах с покрытой лесом площадью и медианой изменения температуры за 10 лет 2,233 °C. Таким образом, сосна обыкновенная изучается в странах с изменением темпе-

ратуры за последние 10 лет от минимального 0,730 °С до максимального значения 3,699 °С [7] (Россия).

Прорастание семян является критическим этапом жизненного цикла дерева и определяет последующую продуктивность и выживаемость, в конечном счете влияя на состав растительного сообщества. Всхожесть семян связана с различными биологическими характеристиками семян, включая размер, массу и форму семян [14].

А. Аннвайер и соавторы (2020) наблюдали достоверное положительное влияние массы семян на всхожесть семян ($p < 0,01$). Всхожесть семян, преобразованная в арксинус, линейно увеличивалась с увеличением массы семян, преобразованной логарифмически [14].

Тем не менее, экспериментальных свидетельств влияния массы семян на всхожесть все еще достаточно мало, и, в основном, они касаются положительного воздействия на всхожесть семян (Catoni et al., 2015; Wang et al., 2016) и выживаемость проростков (Wang, 2009).

В данном конкретном исследовании статистическая гипотеза об отсутствии влияния индивидуальной массы семени сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на показатели его прорастания на 30-й день в SideSlit-контейнерах отклоняется.

Какой показатель, представленный в пилотном обзоре [58], адекватнее опишет изменение качества семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» в автоматизированном питомнике, покажут будущие запланированные исследования.

Исследования по научному проекту [8] позволят дополнить информационно-аналитическую библиотеку лесного репродуктивного материала FLR-Library [60] принципиально новыми данными, обеспечивающими решение задачи синхронизации показателей качества FRM с модулями принятия решения при выполнении технологического процесса лесовосстановления (патент на изобретение РФ 2714705), а также с программными комплексами автоматизированных оптоэлектронных устройств (патент на изобретение РФ 2675056, 2682854, 2687509, 2700759) для экспресс-анализа, сепарирования, капсулирования, высева семян и мониторинга за результатами лесовосстановления.

Выводы

1. Средние значения показателя прорастания семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская» на 30 день в объеме 6, 8, 12, 16, 18, 26 SideSlit-контейнеров статистически (критерий однородности дисперсий Ливиня 6,35; $p = 1,98e-22$; F-критерий однофакторного дисперсионного анализа 1,291; $p = 0,0139$) отличаются от 2, 7, 10, 11, 13, 19, 22, 24, 26, 27, 29 контейнеров.

2. Средние значения индивидуальной массы проросших на 30-й день в ячейках SideSlit-контейнеров автоматизированного лесного питомника 942 семян статистически значимо (статистика Ливиня 11,317; $p = 0,000792$; ANOVA F-criterion 12,098; $p = 0,000523$) отличаются от средних значений индивидуальной массы непроросших 258 семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта «Негорельская».

Список литературы

1. Драпалюк, М. В. Анализ операционных механизированных технологий сепарации семян при искусственном лесовосстановлении / М. В. Драпалюк, А. И. Новиков // Лесотехнический журнал. – 2018. – Т. 8. – № 4. – С. 207–220. – DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c1a3237290288.22345283. – URL: <https://elibrary.ru/akvbnm>.
2. Ермакова, М. В. Комплексная оценка качества семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в лесных питомниках Уральского региона / М. В. Ермакова // Аграрный вестник Урала. – 2009. – № 1 (55). – С. 70–73. – DOI: <https://doi.org/10.15421/412117>. – URL: <https://elibrary.ru/kkpmvb>.
3. Морковина, С. С. Инновационная инфраструктура системы лесного хозяйства: лесные селекционно-семеноводческие центры / С. С. Морковина, О. И. Васильев, А. В. Иванова // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4. – № 4. – С. 221–230. – DOI: <https://doi.org/10.12737/8480>. – URL: <https://elibrary.ru/tondcn>.

4. Морковина, С. С. Инновации в лесном хозяйстве: особенности создания и перспективы / С. С. Морковина, О. М. Корчагин, А. В. Иванова // Лесотехнический журнал. – 2013. – Т. 3. – № 3 (11). – С. 189–199. – URL: <https://elibrary.ru/rqqpjb>.
5. Новиков, А. И. Влияние сортирования семян сосны обыкновенной по цвету и размерам на их грунтовую всхожесть в контейнерах / А. И. Новиков // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37. – № 5. – С. 313–319. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42337219>.
6. Новиков, А. И. Экспресс-анализ лесных семян биофизическими методами / А. И. Новиков. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2018. – 128 с. – URL: <https://elibrary.ru/yzuzgx>.
7. Экспресс-анализ семян в лесохозяйственном производстве: теоретические и технологические аспекты / А. И. Новиков, М. В. Драпалюк, С. В. Соколов, Т. П. Новикова. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – 176 с. – URL: <https://elibrary.ru/hmrfvd>.
8. Исследование спектрометрических показателей семян как основа интенсификации процесса лесовыращивания культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская»: грант РФФИ 23-26-00228 / А. И. Новиков, С. В. Ребко, Т. П. Новикова, Е. П. Петрищев. – Москва : Российский научный фонд, 2023. – URL: <https://elibrary.ru/jtyxuh>.
9. Новиков, А. И. Исследование спектрометрических параметров семенной кожуры сосны обыкновенной в ИК-диапазоне / А. И. Новиков, В. В. Саушкин // Лесотехнический журнал. – 2018. – Т. 8. – № 3. – С. 30–37. – DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b97a164e41782.20107217. – URL: <https://elibrary.ru/votakr>.
10. Петрищев, Е. П. Исследование взаимосвязи биометрических параметров ювенильных сеянцев сосны обыкновенной из кондиционных семян при оценке результатов лесовосстановления / Е. П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 11. – № 4. – С. 161–169. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14>. – URL: <https://elibrary.ru/bsbcms>.
11. Пименов, А. В. Биоразнообразие сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в контрастных экотопах Юга Сибири : дисс. ... д-ра биол. наук / А. В. Пименов. – Красноярск : Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук, 2015. – 406 с. – URL: <https://elibrary.ru/umuqih>.
12. Ребко, С. В. Основные принципы и подходы начального этапа интенсификации процесса лесовыращивания лесных культур сосны обыкновенной сорта «Негорельская» / С. В. Ребко, А. И. Новиков // Лесное хозяйство : матер. 87-й науч.-техн. конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 31 января – 17 февраля 2023 года. – Минск : Белорусский государственный технологический университет, 2023. – С. 322–325. – URL: <https://elibrary.ru/jeasdl>.
13. Ребко, С. В. Сорт сосны обыкновенной «Негорельская» в Беларуси: первый, единственный, уникальный / С. В. Ребко, Л. Ф. Поплавская, В. Н. Балачук // Лесные ресурсы - Белорусское полесье : матер. междунар. конференции молодых ученых, посвященной 90-летию Национальной Академии Наук Беларуси и Году малой родины, Гомель, 24–27 сентября 2018 года. – Гомель : ООО «Типография «Белдрук», 2018. – С. 66–68. – URL: <https://elibrary.ru/suuwhw>.
14. Anniwaer, A. Impacts of snow on seed germination are independent of seed traits and plant ecological characteristics in a temperate desert of Central Asia / A. Anniwaer, Y. Su, X. Zhou, Y. Zhang // Journal of Arid Land. – 2020. – Vol. 12. – № 5. – P. 775–790. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0059-9>.
15. Organic Residues Improve the Quality and Field Initial Growth of *Senna multijuga* Seedlings / E. F. Araújo, L. B. Sousa, R. S. A. Nóbrega et al. // Journal of Sustainable Forestry. – 2021. – Vol. 40. – № 3. – P. 249–262. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1748060>.

16. Application of X-ray and gas discharge visualization methods for *Picea abies* empty and normal seeds evaluation / M. V. Arkhipov, L. P. Gusakova, N. S. Priyatkin, A. S. Bondarenko // *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. – 2014. – № 3. – P. 29–35.
17. Coat Colour Grading of the Scots Pine Seeds Collected from Faraway Provenances Reveals a Different Germination Effect / I. V. Bacherikov, D. E. Raupova, A. S. Durova et al. // *Seeds*. – 2022. – Vol. 1. – № 1. – P. 49–73. – DOI: <https://doi.org/10.3390/seeds1010006>.
18. A Reliable Method to Recognize Soybean Seed Maturation Stages Based on Autofluorescence-Spectral Imaging Combined With Machine Learning Algorithms / T. B. Batista, C. B. Mastrangelo, A. D. de Medeiros et al. // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – № June. – P. 1–14. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.914287>.
19. Phenotypic trait variation in a long-term multisite common garden experiment of Scots pine in Scotland / J. Beaton, A. Perry, J. Cottrell et al. // *Scientific Data*. – 2022. – Vol. 9. – № 1. – P. 671. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01791-8>.
20. Benito Garzón, M. Biogeographical patterns of local adaptation and plasticity of mediterranean pines and their implications under climate change / M. Benito Garzón, N. Vizcaíno-Palomar // *Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. – Springer Verlag, 2021. – P. 71–82. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63625-8_4.
21. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology / R. C. Bernardes, A. De Medeiros, L. da Silva et al. // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12. – № 11. – P. 1801. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111801>.
22. Bilir, N. Morphological variation and quality in Anatolian black pine seedlings / N. Bilir, D. Çetinkaya // *Theoretical and Applied Forestry*. – 2022. – Vol. 2. – № 1. – P. 19–21. – DOI: <https://doi.org/10.53463/tafor.2022vol2iss1pp19-21>.
23. Bockstette, S. W. Impact of genotype and parent origin on the efficacy and optimal timing of GA4/7 stem injections in a lodgepole pine seed orchard / S. W. Bockstette, B. R. Thomas // *New Forests*. – 2020. – Vol. 51. – № 3. – P. 421–434. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09733-w>.
24. Are tree seed systems for forest landscape restoration fit for purpose? An analysis of four asian countries / E. Bosshard, R. Jalonen, T. Kanchanarak et al. // *Diversity*. – 2021. – Vol. 13. – № 11. – P. 575. – DOI: <https://doi.org/10.3390/d13110575>.
25. Bravo-Oviedo, A. Dynamics, Silviculture and Management of Mixed Forests / A. Bravo-Oviedo, H. Pretzsch, M. del Río // *Managing Forest Ecosystems*. – Cham : Springer International Publishing, 2018. – Vol. 31. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91953-9>.
26. Importance and potential of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in 21 st century / J. Brichta, S. Vacek, Z. Vacek et al. // *Central European Forestry Journal*. – 2023. – Vol. 69. – № 1. – P. 3–20. – DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2022-0020>.
27. Seedling Growth and Quality of *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. under Growth Media Composition and Controlled Salinity in an Ex Situ Nursery / B. Budiadi, W. Widiyatno, H. H. Nurjanto et al. // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – № 5. – P. 684. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13050684>.
28. Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function / C. P. Carmona, C. G. Bueno, A. Toussaint et al. // *Nature*. – 2021. – Vol. 597. – № 7878. – P. 683–687. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03871-y>.
29. Çeliktaş, N. Near Infrared Reflectance Spectroscopy and Multivariate Analyses for Fast and Non-Destructive Prediction of Corn Seed Germination / N. Çeliktaş, Ö. Konuşkan // *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*. – 2020. – Vol. 8. – № 8. – P. 1636–1642. – DOI: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i8.1636-1642.3384>.

30. Effect of different irradiance levels on anatomy and growth of two Malvaceae species during two seasons / D. R. Contin, E. Habermann, V. M. Alves, C. A. Martinez // *Revista Brasileira de Botanica*. – 2020. – Vol. 43. – № 2. – P. 257–269. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00609-4>.
31. Effect of different led spectrum regimens on growth and development of *Betula pubescens* Ehrh. and *Rubus idaeus* L. in culture in vitro / P. Evlakov, T. Grodeckaya, O. Fedorova et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 14–30. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/2>.
32. Detection of *Drechslera avenae* (Eidam) Sharif [*Helminthosporium avenae* (Eidam)] in Black Oat Seeds (*Avena strigosa* Schreb) Using Multispectral Imaging / F. França-Silva, C. H. Q. Rego, F. G. Gomes-Junior et al. // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – № 12. – P. 3343. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s20123343>.
33. Influence of exogenous application of abscisic acid in gas exchanges of *Hymenaea courbaril* L. (Fabaceae) seedlings subjected to water deficit / V. D. M. B. Freitas, S. D. P. Q. Scalon, D. M. Dresch et al. // *Floresta*. – 2018. – Vol. 48. – № 2. – P. 163. – DOI: <https://doi.org/10.5380/rev.v48i2.53076>.
34. Recent research progress in geochemical properties and restoration of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation / J. tao Fu, D. mei Yu, X. Chen et al. // *Journal of Mountain Science*. – 2019. – Vol. 16. – № 9. – P. 2079–2095. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4752-x>.
35. Hacisalihoglu, G. Crop Seed Phenomics: Focus on Non-Destructive Functional Trait Phenotyping Methods and Applications / G. Hacisalihoglu, P. Armstrong // *Plants*. – 2023. – Vol. 12. – № 5. – P. 1177. – DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12051177>.
36. Managing uncertainty in Scots pine range-wide adaptation under climate change / H. R. Hallingbäck, V. Burton, N. Vizcaino-Palomar et al. // *Frontiers in Ecology and Evolution*. – 2021. – Vol. 9. – P. 724051. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.724051>.
37. Applications of machine learning in pine nuts classification / B. Huang, J. Liu, J. Jiao et al. // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 1–11. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12754-9>.
38. Seedling Quality in Serbia – Results from a Three-Year Survey / V. Ivetić, Z. Maksimović, I. Kerkez, J. Devetaković // *Reforesta*. – 2017. – № 4. – P. 27–53. – DOI: <https://doi.org/10.21750/REFOR.4.04.43>.
39. Ivetić, V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić, A. I. Novikov // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 56–65. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
40. Seed enhancement technologies for sustainable dryland restoration: Coating and scarification / H. Jarrar, A. El-Keblawy, C. Ghenai et al. // *Science of The Total Environment*. – 2023. – P. 166150. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166150>.
41. Effects of substrate and water availability on the initial growth of *Alibertia edulis* Rich. / T. S. Jeromini, L. H. de S. Mota, S. D. P. Q. Scalon et al. // *Floresta*. – 2018. – Vol. 49. – № 1. – P. 089. – DOI: <https://doi.org/10.5380/rev.v49i1.57122>.
42. Somatic embryogenesis in *Abies nebrodensis*, an endangered Sicilian fir / N. Jouini, E. Yahyaoui, W. Tarraf et al. // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. – 2023. – Vol. 152. – № 2. – P. 393–404. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02415-0>.
43. Kang, K.-S. Seed orchards (Establishment, Management and Genetics) / K.-S. Kang, N. Bilir. – Ankara, Turkey : OGEM-VAK Press, 2021. – 189 p.
44. Seasonal changes of perlite–peat substrate properties in seedlings grown in different sized container trays / M. Kormanek, S. Małek, J. Banach et al. // *New Forests*. – 2021. – Vol. 52. – № 2. – P. 271–283. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09793-3>.
45. Effect of biochar amendment on the properties of growing media and growth of containerized norway spruce, scots pine, and silver birch seedlings / E. Köster, J. Pumpanen, M. Palviainen et al. // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2021. – Vol. 51. – № 1. – P. 31–40. – DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0399>.

46. Tamm Review: Ecological principles to guide post-fire forest landscape management in the Inland Pacific and Northern Rocky Mountain regions / A. J. Larson, S. M. A. Jeronimo, P. F. Hessburg et al. // *Forest Ecology and Management*. – 2022. – Vol. 504. – P. 119680. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119680>.
47. Superação de Dormência e Produção de Mudanças de Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) em Diferentes Substratos / R. de Q. Lemes, P. C. da Silva Filho, P. R. L. Souza, L. W. dos Santos // *Uniciências*. – 2023. – Vol. 26. – № 2. – P. 120–123. – DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2022v26n2p120-123>.
48. An effective and friendly tool for seed image analysis / A. Loddo, C. Di Ruberto, A. M. P. G. Vale et al. // *The Visual Computer*. – 2023. – Vol. 39. – № 1. – P. 335–352. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-021-02333-w>.
49. Alternative substrates and fertilization doses in the production of *Pinus cembroides* Zucc. in nursery / R. E. Madrid-Aispuro, J. A. Prieto-Ruiz, A. Aldrete et al. // *Forests*. – 2020. – Vol. 11. – № 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f11010071>.
50. Heat Stress Affects the Physiological and Biochemical Quality of *Dalbergia nigra* Seeds in vitro / I. Medeiros Simões, J. Oliveira Baptista, T. Lins Monteiro Rosa et al. // *Forest Science*. – 2021. – Vol. 67. – № 6. – P. 731–739. – DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/xfab036>.
51. Scots pine's capacity to adapt to climate change in hemi-boreal forests in relation to dominating tree increment and site condition / M. Mikalajunas, H. Pretzsch, G. Mozgeris et al. // *iForest - Biogeosciences and Forestry*. – 2021. – Vol. 14. – № 5. – P. 473–482. – DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer3703-014>.
52. Efficiency of the CL, DRIS and CND methods in assessing the nutritional status of *Eucalyptus* spp. rooted cuttings / T. C. B. de Moraes, R. M. Prado, E. I. F. Traspadini et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 9. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10090786>.
53. Pine nut species recognition using NIR spectroscopy and image analysis / R. Moschetti, D. H. Berhe, M. Agrimi et al. // *Journal of Food Engineering*. – 2021. – Vol. 292. – P. 110357. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110357>.
54. Use of physiological parameters to assess seedlings quality of *Eugenia dysenterica* DC. grown in different substrates / C. S. Mota, F. G. Silva, P. Dornelles et al. // *Australian Journal of Crop Science*. – 2016. – Vol. 10. – № 6. – P. 842–851. – DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.06.p7501>.
55. Assessment of Brassicaceae Seeds Quality by X-ray Analysis / F. Musaev, N. Priyatkin, N. Potrakhov et al. // *Horticulturae*. – 2021. – Vol. 8. – № 1. – P. 29. – DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010029>.
56. X-ray analysis of seed quality of *Eucommia ulmoides* Oliv. of different geographical origin / Q. T. Nguyen, S. G. Sakharova, N. S. Priyatkin, A. V. Zhigunov // *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*. – 2021. – № 234. – P. 134–151. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.234.134-151>.
57. Novikov, A. I. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / A. I. Novikov, V. Ivetic // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – P. 012043. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012043>.
58. Dickson Quality Index: relation to technological impact on forest seeds / A. I. Novikov, S. Rabko, T. P. Novikova, E. P. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 23–36. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>.
59. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / A. I. Novikov, S. V. Sokolov, M. V. Drapalyuk et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 12. – P. 1064. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121064>.
60. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7. – № 1. – P. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
61. Climate Warming Impacts on Distributions of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seed Zones and Seed Mass across Russia in the 21st Century / E. I. Parfenova, N. A. Kuzmina, S. R. Kuzmin, N. M. Tchebakova // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – № 8. – P. 1097. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12081097>.

62. Gender, reproductive output covariation and their role on gene diversity of *Pinus koraiensis* seed orchard crops / J.-M. Park, H.-I. Kang, D.-B. Yeom et al. // *BMC Plant Biology*. – 2020. – Vol. 20. – № 1. – P. 418. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02632-9>.
63. Application of multispectral imaging combined with machine learning models to discriminate special and traditional green coffee / W. Pinheiro Claro Gomes, L. Gonçalves, C. Barboza da Silva, W. R. Melchert // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2022. – Vol. 198. – P. 107097. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107097>.
64. Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe / H. Pretzsch, M. del Río, C. Ammer et al. // *European Journal of Forest Research*. – 2015. – Vol. 134. – № 5. – P. 927–947. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0900-4>.
65. Examination of digital X-ray and gas discharge characteristics of English oak acorns (*Quercus robur* L.) for assessment of their sowing qualities / N. S. Priyatkin, O. Y. Butenko, D. A. Shabunin et al. // *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. – 2018. – P. 4–17. – DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2018.2.4>.
66. Przybylski, P. Isozyme polymorphism and seed and cone variability of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in relation to local environments in Poland / P. Przybylski, K. Masternak, S. Jastrzębowski // *Folia Forestalia Polonica*. – 2020. – Vol. 62. – № 2. – P. 88–99. – DOI: <https://doi.org/10.2478/ffp-2020-0010>.
67. Morphophysiology and quality of *Alibertia edulis* seedlings grown under light contrast and organic residue / C. C. Santos, A. Goelzer, O. B. da Silva et al. // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. – 2023. – Vol. 27. – № 5. – P. 375–382. – DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n5p375-382>.
68. Effects of five growing media and two fertilizer levels on polybag-Raised camden whitegum (*Eucalyptus benthamii* maiden & cambage) seedling morphology and drought hardiness / M. N. Shalizi, B. Goldfarb, O. T. Burney, T. H. Shear // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 7. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10070543>.
69. How Shading and Container Type Influence *Ilex paraguariensis* A.St.-Hil. Seedling Production / L. Siqueira Walter, M. Melo Moura, M. Moreno Gabira et al. // *Forest Science*. – 2022. – Vol. 68. – № 5–6. – P. 533–539. – DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/xfac036>.
70. South, D.B. Why Healthy Pine Seedlings Die after They Leave the Nursery / D. B. South, T. E. Starkey, A. Lyons // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – № 3. – P. 645. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14030645>.
71. Controlled-Release Fertiliser and Substrates on Seedling Growth and Quality in *Agonandra brasiliensis* in Roraima / A. das G. Souza, O. J. Smiderle, R.A. Montenegro et al. // *Journal of Agricultural Studies*. – 2020. – Vol. 8. – № 3. – P. 70. – DOI: <https://doi.org/10.5296/jas.v8i3.16363>.
72. Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration / P. Spathelf, J. Stanturf, M. Kleine et al. // *Annals of Forest Science*. – 2018. – Vol. 75. – № 2. – P. 55. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4>.
73. Multivariate discriminant analysis of single seed near infrared spectra for sorting dead-filled and viable seeds of three pine species: does one model fit all species? / M. Tigabu, A. Daneshvar, R. Jingjing et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 6. – P. article id 469. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10060469>.
74. Rapid and non-destructive evaluation of seed quality of Chinese fir by near infrared spectroscopy and multivariate discriminant analysis / M. Tigabu, A. Daneshvar, P. Wu et al. // *New Forests*. – 2020. – Vol. 51. – № 3. – P. 395–408. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09735-8>.
75. Quantitative magnetic resonance imaging of Scots pine seeds and the assessment of germination potential / T. V. Tuomainen, K. Himanen, P. Helenius et al. // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2022. – Vol. 52. – № 5. – P. 685–695. – DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0273>.
76. A review of the application of near-infrared spectroscopy (NIRS) in forestry / Y. Wang, J. Xiang, Y. Tang et al. // *Applied Spectroscopy Reviews*. – 2022. – Vol. 57. – № 4. – P. 300–317. – DOI: <https://doi.org/10.1080/05704928.2021.1875481>.

References

1. Drapalyuk M. V., Novikov A. I. Analysis of operational mechanized technologies of seed separation in artificial reforestation. *Forestry Engineering Journal*. 2018; 8;4: 207–220 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5c1a3237290288.22345283. – URL: <https://elibrary.ru/akvbnm>.
2. Ermakova, M. V. Comprehensive assessment of the quality of seedlings of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in forest nurseries of the Ural region / M. V. Ermakova // *Agrarian Bulletin of the Urals*. – 2009. – № 1 (55). – P. 70–73 (in Russian). – DOI: <https://doi.org/10.15421/412117>. – URL: <https://elibrary.ru/kkpmvb>.
3. Morkovina S. S., Vasiliev O. I., Ivanova A. V. Innovative infrastructure of the forestry system: forest breeding and seed centers // *Forestry Engineering Journal*. 2014; 4;4: 221–230 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.12737/8480>. – URL: <https://elibrary.ru/tondcn>.
4. Morkovina, S. S. Innovations in forestry: features of creation and prospects / S. S. Morkovina, O. M. Korchagin, A. V. Ivanova // *Forestry Journal*. – 2013. – Vol. 3. – № 3(11). – Pp. 189–199 (in Russian). – URL: <https://elibrary.ru/rqqpjb>.
5. Novikov, A. I. The effect of sorting the seeds of scots pine by color and size on their soil germination in containers / A. I. Novikov // *Coniferous boreal zones*. – 2019. – Vol. 37. – No. 5. – pp. 313–319 (in Russian). – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42337219>.
6. Novikov, A. I. Express analysis of forest seeds by biophysical methods / A. I. Novikov. – Voronezh : VSUFT, 2018. – 128 p. (in Russian). – URL: <https://elibrary.ru/yzuzgx>.
7. Express analysis of seeds in forestry production: theoretical and technological aspects / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, S. V. Sokolov, T. P. Novikova. – Voronezh : VSUFT, 2022. – 176 p. (in Russian). – URL: <https://elibrary.ru/hmrfvd>.
8. The study of spectrometric indicators of seeds as a basis for the intensification of the process of reforestation of ordinary pine cultivars of the "Negorelskaya" variety : grant RNF 23-26-00228 / A. I. Novikov, S. V. Rebko, T. P. Novikova, E. P. Petrishchev. – Moskva : Russian Scientific Foundation, 2023. – URL: <https://elibrary.ru/jtyxux> (in Russian).
9. Novikov A. I., Saushkin V. V. Investigation of spectrometric parameters of the seed coat of Scots pine in the IR range. *Forestry Engineering Journal*. 2018; 8;3: 30–37 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5b97a164e41782.20107217. – URL: <https://elibrary.ru/votakr>.
10. Petrishchev, E. P. Investigation of the relationship of biometric parameters of juvenile seedlings of scots pine from conditioned seeds in assessing the results of reforestation / E. P. Petrishchev // *Forestry Journal*. – 2022. – Vol. 11. – No. 4. – P. 161–169 (in Russian). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14>. – URL: <https://elibrary.ru/bsbcms>.
11. Pimenov, A. V. Biodiversity of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in contrasting ecotopes of Southern Siberia: diss. ... doctor of Biological Sciences / A. V. Pimenov. – Krasnoyarsk : V.N. Sukachev Forest Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015. – 406 p. (in Russian). – URL: <https://elibrary.ru/umuqih>.
12. Rebko, S. V. Basic principles and approaches of the initial stage of intensification of the process of reforestation of forest crops of the common pine variety "Negorelskaya" / S. V. Rebko, A. I. Novikov // *Forestry : Materials of the 87th scientific and technical conference of the teaching staff, researchers and postgraduates (with international participation)*, Minsk, 31 January – February 17, 2023. – Minsk : Belarusian State Technological University, 2023. – P. 322–325 (in Russian). – URL: <https://elibrary.ru/jeasdl>.
13. Rebko, S. V. The variety of common pine "Negorelskaya" in Belarus: the first, the only, unique / S. V. Rebko, L. F. Poplavskaya, V. N. Balanchuk // *Forest resources - Belarusian Polesie : materials of the international conference of young scientists dedicated to the 90th anniversary of the National Academy of Sciences of Belarus and the Year of the Small Motherland*, Gomel, September 24-27, 2018. – Gomel : LLC "Printing House "Beldruk", 2018. – P. 66–68. – Available: <https://elibrary.ru/suuwhw>.

14. Anniwaer, A. Impacts of snow on seed germination are independent of seed traits and plant ecological characteristics in a temperate desert of Central Asia / A. Anniwaer, Y. Su, X. Zhou, Y. Zhang // *Journal of Arid Land*. – 2020. – Vol. 12. – № 5. – P. 775–790. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0059-9>.
15. Organic Residues Improve the Quality and Field Initial Growth of *Senna multijuga* Seedlings / E. F. Araújo, L. B. Sousa, R. S. A. Nóbrega et al. // *Journal of Sustainable Forestry*. – 2021. – Vol. 40. – № 3. – P. 249–262. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1748060>.
16. Application of X-ray and gas discharge visualization methods for *Picea abies* empty and normal seeds evaluation / M. V. Arkhipov, L. P. Guskova, N. S. Priyatkin, A. S. Bondarenko // *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. – 2014. – № 3. – P. 29–35.
17. Coat Colour Grading of the Scots Pine Seeds Collected from Faraway Provenances Reveals a Different Germination Effect / I. V. Bacherikov, D. E. Raupova, A. S. Durova et al. // *Seeds*. – 2022. – Vol. 1. – № 1. – P. 49–73. – DOI: <https://doi.org/10.3390/seeds1010006>.
18. A Reliable Method to Recognize Soybean Seed Maturation Stages Based on Autofluorescence-Spectral Imaging Combined With Machine Learning Algorithms / T. B. Batista, C. B. Mastrangelo, A. D. de Medeiros et al. // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – № June. – P. 1–14. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.914287>.
19. Phenotypic trait variation in a long-term multisite common garden experiment of Scots pine in Scotland / J. Beaton, A. Perry, J. Cottrell et al. // *Scientific Data*. – 2022. – Vol. 9. – № 1. – P. 671. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01791-8>.
20. Benito Garzón, M. Biogeographical patterns of local adaptation and plasticity of mediterranean pines and their implications under climate change / M. Benito Garzón, N. Vizcaíno-Palomar // *Pines and Their Mixed Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. – Springer Verlag, 2021. – P. 71–82. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63625-8_4.
21. Deep-Learning Approach for Fusarium Head Blight Detection in Wheat Seeds Using Low-Cost Imaging Technology / R. C. Bernardes, A. De Medeiros, L. da Silva et al. // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12. – № 11. – P. 1801. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12111801>.
22. Bilir, N. Morphological variation and quality in Anatolian black pine seedlings / N. Bilir, D. Çetinkaya // *Theoretical and Applied Forestry*. – 2022. – Vol. 2. – № 1. – P. 19–21. – DOI: <https://doi.org/10.53463/tafor.2022vol2iss1pp19-21>.
23. Bockstette, S. W. Impact of genotype and parent origin on the efficacy and optimal timing of GA4/7 stem injections in a lodgepole pine seed orchard / S. W. Bockstette, B. R. Thomas // *New Forests*. – 2020. – Vol. 51. – № 3. – P. 421–434. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09733-w>.
24. Are tree seed systems for forest landscape restoration fit for purpose? An analysis of four asian countries / E. Bosshard, R. Jalonen, T. Kanchanarak et al. // *Diversity*. – 2021. – Vol. 13. – № 11. – P. 575. – DOI: <https://doi.org/10.3390/d13110575>.
25. Bravo-Oviedo, A. Dynamics, Silviculture and Management of Mixed Forests / A. Bravo-Oviedo, H. Pretzsch, M. del Río // *Managing Forest Ecosystems*. – Cham : Springer International Publishing, 2018. – Vol. 31. – DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91953-9>.
26. Importance and potential of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in 21 st century / J. Brichta, S. Vacek, Z. Vacek et al. // *Central European Forestry Journal*. – 2023. – Vol. 69. – № 1. – P. 3–20. – DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2022-0020>.
27. Seedling Growth and Quality of *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. under Growth Media Composition and Controlled Salinity in an Ex Situ Nursery / B. Budiadi, W. Widiyatno, H. H. Nurjanto et al. // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – № 5. – P. 684. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f13050684>.

28. Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function / C. P. Carmona, C. G. Bueno, A. Toussaint et al. // *Nature*. – 2021. – Vol. 597. – № 7878. – P. 683–687. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03871-y>.
29. Çeliktaş, N. Near Infrared Reflectance Spectroscopy and Multivariate Analyses for Fast and Non-Destructive Prediction of Corn Seed Germination / N. Çeliktaş, Ö. Konaşkan // *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*. – 2020. – Vol. 8. – № 8. – P. 1636–1642. – DOI: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i8.1636-1642.3384>.
30. Effect of different irradiance levels on anatomy and growth of two Malvaceae species during two seasons / D. R. Contin, E. Habermann, V. M. Alves, C. A. Martinez // *Revista Brasileira de Botanica*. – 2020. – Vol. 43. – № 2. – P. 257–269. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00609-4>.
31. Effect of different led spectrum regimens on growth and development of *Betula pubescens* Ehrh. and *Rubus idaeus* L. in culture in vitro / P. Evlakov, T. Grodeckaya, O. Fedorova et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 14–30. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/2>.
32. Detection of *Drechslera avenae* (Eidam) Sharif [*Helminthosporium avenae* (Eidam)] in Black Oat Seeds (*Avena strigosa* Schreb) Using Multispectral Imaging / F. França-Silva, C. H. Q. Rego, F. G. Gomes-Junior et al. // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20. – № 12. – P. 3343. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s20123343>.
33. Influence of exogenous application of abscisic acid in gas exchanges of *Hymenaea courbaril* L. (Fabaceae) seedlings subjected to water deficit / V. D. M. B. Freitas, S. D. P. Q. Scalon, D. M. Dresch et al. // *Floresta*. – 2018. – Vol. 48. – № 2. – P. 163. – DOI: <https://doi.org/10.5380/ufv.v48i2.53076>.
34. Recent research progress in geochemical properties and restoration of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation / J. tao Fu, D. mei Yu, X. Chen et al. // *Journal of Mountain Science*. – 2019. – Vol. 16. – № 9. – P. 2079–2095. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4752-x>.
35. Hacisalihoglu, G. Crop Seed Phenomics: Focus on Non-Destructive Functional Trait Phenotyping Methods and Applications / G. Hacisalihoglu, P. Armstrong // *Plants*. – 2023. – Vol. 12. – № 5. – P. 1177. – DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12051177>.
36. Managing uncertainty in Scots pine range-wide adaptation under climate change / H. R. Hallingbäck, V. Burton, N. Vizcaíno-Palomar et al. // *Frontiers in Ecology and Evolution*. – 2021. – Vol. 9. – P. 724051. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.724051>.
37. Applications of machine learning in pine nuts classification / B. Huang, J. Liu, J. Jiao et al. // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 1–11. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12754-9>.
38. Seedling Quality in Serbia – Results from a Three-Year Survey / V. Ivetić, Z. Maksimović, I. Kerkez, J. Devetaković // *Reforest. – 2017. – № 4. – P. 27–53. – DOI: https://doi.org/10.21750/REFOR.4.04.43.*
39. Ivetić, V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić, A. I. Novikov // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 56–65. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
40. Seed enhancement technologies for sustainable dryland restoration: Coating and scarification / H. Jarrar, A. El-Keblawy, C. Ghenai et al. // *Science of The Total Environment*. – 2023. – P. 166150. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166150>.
41. Effects of substrate and water availability on the initial growth of *Alibertia edulis* Rich. / T. S. Jeromini, L. H. de S. Mota, S. D. P. Q. Scalon et al. // *Floresta*. – 2018. – Vol. 49. – № 1. – P. 089. – DOI: <https://doi.org/10.5380/ufv.v49i1.57122>.
42. Somatic embryogenesis in *Abies nebrodensis*, an endangered Sicilian fir / N. Jouini, E. Yahyaoui, W. Tarraf et al. // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. – 2023. – Vol. 152. – № 2. – P. 393–404. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02415-0>.
43. Kang, K.-S. Seed orchards (Establishment, Management and Genetics) / K.-S. Kang, N. Bilir. – Ankara, Turkey : OGEM-VAK Press, 2021. – 189 p.

44. Seasonal changes of perlite–peat substrate properties in seedlings grown in different sized container trays / M. Kormanek, S. Małek, J. Banach et al. // *New Forests*. – 2021. – Vol. 52. – № 2. – P. 271–283. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09793-3>.
45. Effect of biochar amendment on the properties of growing media and growth of containerized norway spruce, scots pine, and silver birch seedlings / E. Köster, J. Pumpanen, M. Palviainen et al. // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2021. – Vol. 51. – № 1. – P. 31–40. – DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0399>.
46. Tamm Review: Ecological principles to guide post-fire forest landscape management in the Inland Pacific and Northern Rocky Mountain regions / A. J. Larson, S. M. A. Jeronimo, P. F. Hessburg et al. // *Forest Ecology and Management*. – 2022. – Vol. 504. – P. 119680. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119680>.
47. Superação de Dormência e Produção de Mudas de Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) em Diferentes Substratos / R. de Q. Lemes, P. C. da Silva Filho, P. R. L. Souza, L. W. dos Santos // *Uniciências*. – 2023. – Vol. 26. – № 2. – P. 120–123. – DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2022v26n2p120-123>.
48. An effective and friendly tool for seed image analysis / A. Loddo, C. Di Ruberto, A. M. P. G. Vale et al. // *The Visual Computer*. – 2023. – Vol. 39. – № 1. – P. 335–352. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00371-021-02333-w>.
49. Alternative substrates and fertilization doses in the production of *Pinus cembroides* Zucc. in nursery / R. E. Madrid-Aispuro, J. A. Prieto-Ruiz, A. Aldrete et al. // *Forests*. – 2020. – Vol. 11. – № 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f11010071>.
50. Heat Stress Affects the Physiological and Biochemical Quality of *Dalbergia nigra* Seeds in vitro / I. Medeiros Simões, J. Oliveira Baptista, T. Lins Monteiro Rosa et al. // *Forest Science*. – 2021. – Vol. 67. – № 6. – P. 731–739. – DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/xfab036>.
51. Scots pine's capacity to adapt to climate change in hemi-boreal forests in relation to dominating tree increment and site condition / M. Mikalajunas, H. Pretzsch, G. Mozgeris et al. // *iForest - Biogeosciences and Forestry*. – 2021. – Vol. 14. – № 5. – P. 473–482. – DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer3703-014>.
52. Efficiency of the CL, DRIS and CND methods in assessing the nutritional status of *Eucalyptus* spp. rooted cuttings / T. C. B. de Moraes, R. M. Prado, E. I. F. Traspadini et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 9. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10090786>.
53. Pine nut species recognition using NIR spectroscopy and image analysis / R. Moschetti, D. H. Berhe, M. Agrimi et al. // *Journal of Food Engineering*. – 2021. – Vol. 292. – P. 110357. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110357>.
54. Use of physiological parameters to assess seedlings quality of *Eugenia dysenterica* DC. grown in different substrates / C. S. Mota, F. G. Silva, P. Dornelles et al. // *Australian Journal of Crop Science*. – 2016. – Vol. 10. – № 6. – P. 842–851. – DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.06.p7501>.
55. Assessment of Brassicaceae Seeds Quality by X-ray Analysis / F. Musaeu, N. Priyatkin, N. Potrakhov et al. // *Horticulturae*. – 2021. – Vol. 8. – № 1. – P. 29. – DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae8010029>.
56. X-ray analysis of seed quality of *Eucommia ulmoides* Oliv. of different geographical origin / Q. T. Nguyen, S. G. Sakharova, N. S. Priyatkin, A. V. Zhigunov // *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*. – 2021. – № 234. – P. 134–151. – DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.234.134-151>.
57. Novikov, A. I. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / A. I. Novikov, V. Ivetić // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – P. 012043. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012043>.
58. Dickson Quality Index: relation to technological impact on forest seeds / A. I. Novikov, S. Rabko, T. P. Novikova, E. P. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 23–36. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>.
59. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / A. I. Novikov, S. V. Sokolov, M. V. Drapalyuk et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 12. – P. 1064. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121064>.

60. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7. – № 1. – P. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
61. Climate Warming Impacts on Distributions of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Seed Zones and Seed Mass across Russia in the 21st Century / E. I. Parfenova, N. A. Kuzmina, S. R. Kuzmin, N. M. Tchebakova // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – № 8. – P. 1097. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f12081097>.
62. Gender, reproductive output covariation and their role on gene diversity of *Pinus koraiensis* seed orchard crops / J.-M. Park, H.-I. Kang, D.-B. Yeom et al. // *BMC Plant Biology*. – 2020. – Vol. 20. – № 1. – P. 418. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02632-9>.
63. Application of multispectral imaging combined with machine learning models to discriminate special and traditional green coffee / W. Pinheiro Claro Gomes, L. Gonçalves, C. Barboza da Silva, W. R. Melchert // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2022. – Vol. 198. – P. 107097. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107097>.
64. Growth and yield of mixed versus pure stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) analysed along a productivity gradient through Europe / H. Pretzsch, M. del Río, C. Ammer et al. // *European Journal of Forest Research*. – 2015. – Vol. 134. – № 5. – P. 927–947. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0900-4>.
65. Examination of digital X-ray and gas discharge characteristics of English oak acorns (*Quercus robur* L.) for assessment of their sowing qualities / N. S. Priyatkin, O. Y. Butenko, D. A. Shabunin et al. // *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. – 2018. – P. 4–17. – DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2018.2.4>.
66. Przybylski, P. Isozyme polymorphism and seed and cone variability of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in relation to local environments in Poland / P. Przybylski, K. Masternak, S. Jastrzębowski // *Folia Forestalia Polonica*. – 2020. – Vol. 62. – № 2. – P. 88–99. – DOI: <https://doi.org/10.2478/ffp-2020-0010>.
67. Morphophysiology and quality of *Alibertia edulis* seedlings grown under light contrast and organic residue / C. C. Santos, A. Goelzer, O. B. da Silva et al. // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. – 2023. – Vol. 27. – № 5. – P. 375–382. – DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n5p375-382>.
68. Effects of five growing media and two fertilizer levels on polybag-Raised camden whitegum (*Eucalyptus benthamii* maiden & cambage) seedling morphology and drought hardiness / M. N. Shalizi, B. Goldfarb, O. T. Burney, T. H. Shear // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 7. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10070543>.
69. How Shading and Container Type Influence *Ilex paraguariensis* A.St.-Hil. Seedling Production / L. Siqueira Walter, M. Melo Moura, M. Moreno Gabira et al. // *Forest Science*. – 2022. – Vol. 68. – № 5-6. – P. 533–539. – DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxac036>.
70. South, D.B. Why Healthy Pine Seedlings Die after They Leave the Nursery / D. B. South, T. E. Starkey, A. Lyons // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – № 3. – P. 645. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14030645>.
71. Controlled-Release Fertiliser and Substrates on Seedling Growth and Quality in *Agonandra brasiliensis* in Roraima / A. das G. Souza, O. J. Smiderle, R.A. Montenegro et al. // *Journal of Agricultural Studies*. – 2020. – Vol. 8. – № 3. – P. 70. – DOI: <https://doi.org/10.5296/jas.v8i3.16363>.
72. Adaptive measures: integrating adaptive forest management and forest landscape restoration / P. Spathelf, J. Stanturf, M. Kleine et al. // *Annals of Forest Science*. – 2018. – Vol. 75. – № 2. – P. 55. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0736-4>.
73. Multivariate discriminant analysis of single seed near infrared spectra for sorting dead-filled and viable seeds of three pine species: does one model fit all species? / M. Tigabu, A. Daneshvar, R. Jingjing et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 6. – P. article id 469. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f10060469>.
74. Rapid and non-destructive evaluation of seed quality of Chinese fir by near infrared spectroscopy and multivariate discriminant analysis / M. Tigabu, A. Daneshvar, P. Wu et al. // *New Forests*. – 2020. – Vol. 51. – № 3. – P. 395–408. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09735-8>.

75. Quantitative magnetic resonance imaging of Scots pine seeds and the assessment of germination potential / T. V. Tuomainen, K. Himanen, P. Helenius et al. // Canadian Journal of Forest Research. – 2022. – Vol. 52. – № 5. – P. 685–695. – DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0273>.

76. A review of the application of near-infrared spectroscopy (NIRS) in forestry / Y. Wang, J. Xiang, Y. Tang et al. // Applied Spectroscopy Reviews. – 2022. – Vol. 57. – № 4. – P. 300–317. – DOI: <https://doi.org/10.1080/05704928.2021.1875481>.

Приложение А. Данные, полученные в данном исследовании, для построения статистических диаграмм

Таблица А1

Степень прорастания на 30-й день групп (по индивидуальной массе, семян (N = 1200) сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) сорта Негорельская в SideSlit-контейнерах автоматизированного лесного питомника

Table A1

30-day germination degree of groups (by single seed mass, groups number $m = 89$) seeds (N = 1200) of Negorelskaya variety Scots pine (*P. sylvestris* L.) in SideSlit-containers of an automated forest nursery

Группы семян | Seed groups	Число семян в группе n | Number n of seeds in group	Степень прорастания семян на 30-й день, среднее значение в группе | 30-day germination degree for group, mean	Стандартное отклонение | Standard de- viation	Стандартная ошибка | Standard error	95 % доверительный интервал для среднего значения | 95 % confidence interval for the mean	
					Нижняя граница | Lower bound	Верхняя граница | Upper bound
по индивидуальной массе, г | by individual seed mass, g (число групп $m = 89$)						
,0010	4	,25	,500	,250	-,55	1,05
,0013	1	,00	.	.	.	.
,0014	1	,00	.	.	.	.
,0015	5	,20	,447	,200	-,36	,76
,0016	1	,00	.	.	.	.
,0017	1	,00	.	.	.	.
,0019	1	,00	.	.	.	.
,0020	8	,38	,518	,183	-,06	,81
,0022	1	,00	.	.	.	.
,0024	1	1,00	.	.	.	.
,0025	7	,71	,488	,184	,26	1,17
,0028	1	1,00	.	.	.	.
,0030	15	,60	,507	,131	,32	,88
,0032	2	,50	,707	,500	-5,85	6,85
,0033	3	,67	,577	,333	-,77	2,10
,0034	2	,50	,707	,500	-5,85	6,85
,0035	28	,68	,476	,090	,49	,86
,0036	1	1,00	.	.	.	.
,0037	1	1,00	.	.	.	.
,0038	4	,50	,577	,289	-,42	1,42
,0039	3	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0040	48	,71	,459	,066	,57	,84
,0041	2	,50	,707	,500	-5,85	6,85
,0042	4	,75	,500	,250	-,05	1,55
,0043	10	,90	,316	,100	,67	1,13
,0044	4	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0045	77	,83	,377	,043	,75	,92
,0046	3	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0047	12	,92	,289	,083	,73	1,10
,0048	16	,69	,479	,120	,43	,94
,0049	7	,86	,378	,143	,51	1,21
,0050	101	,79	,408	,041	,71	,87
,0051	4	,75	,500	,250	-,05	1,55
,0052	13	,77	,439	,122	,50	1,03
,0053	15	,80	,414	,107	,57	1,03
,0054	12	,83	,389	,112	,59	1,08
,0055	124	,80	,403	,036	,73	,87
,0056	8	,88	,354	,125	,58	1,17
,0057	16	,94	,250	,063	,80	1,07
,0058	7	,86	,378	,143	,51	1,21

Природопользование

Группы семян | Seed groups	Число семян в группе <i>n</i> | Number <i>n</i> of seeds in group	Степень прорастания семян на 30-й день, среднее значение в группе | 30-day germination degree for group, mean	Стандартное отклонение | Standard de- viation	Стандартная ошибка | Standard error	95 % доверительный интервал для среднего значения | 95 % confidence interval for the mean	
					Нижняя граница | Lower bound	Верхняя граница | Upper bound
,0059	3	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0060	130	,82	,383	,034	,76	,89
,0061	1	1,00	.	.	.	.
,0062	13	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0063	10	,70	,483	,153	,35	1,05
,0064	8	,63	,518	,183	,19	1,06
,0065	113	,78	,417	,039	,70	,86
,0066	4	,75	,500	,250	-,05	1,55
,0067	10	,90	,316	,100	,67	1,13
,0068	4	,75	,500	,250	-,05	1,55
,0069	6	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0070	69	,80	,405	,049	,70	,89
,0071	2	,50	,707	,500	-5,85	6,85
,0072	6	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0073	7	,86	,378	,143	,51	1,21
,0074	4	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0075	69	,84	,369	,044	,75	,93
,0076	3	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0077	2	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0078	1	1,00	.	.	.	.
,0080	35	,71	,458	,077	,56	,87
,0081	2	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0082	2	,50	,707	,500	-5,85	6,85
,0083	4	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0084	1	1,00	.	.	.	.
,0085	22	,50	,512	,109	,27	,73
,0086	4	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0087	1	1,00	.	.	.	.
,0088	4	,75	,500	,250	-,05	1,55
,0089	1	1,00	.	.	.	.
,0090	26	,73	,452	,089	,55	,91
,0091	1	1,00	.	.	.	.
,0092	2	,00	,000	,000	,00	,00
,0093	2	,50	,707	,500	-5,85	6,85
,0094	3	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0095	16	,81	,403	,101	,60	1,03
,0100	9	,89	,333	,111	,63	1,15
,0101	1	1,00	.	.	.	.
,0102	2	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0103	2	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0104	2	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0105	8	,88	,354	,125	,58	1,17
,0109	1	1,00	.	.	.	.
,0110	2	,50	,707	,500	-5,85	6,85
,0115	2	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0120	1	1,00	.	.	.	.
,0121	2	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0130	2	1,00	,000	,000	1,00	1,00
,0133	1	1,00	.	.	.	.
по наборам семян, отобранных для исследования (число групп <i>m</i> = 3)						
1	400	,80	,404	,020	,76	,83
2	400	,81*	,391	,020	,77	,85
3	400	,75*	,435	,022	,70	,79
в объеме каждого SideSlit-контейнера (число групп <i>m</i> = 30)						
1	40	,80	,405	,064	,67	,93
2	40	,75	,439	,069	,61	,89
3	40	,80	,405	,064	,67	,93
4	40	,78	,423	,067	,64	,91
5	40	,78	,423	,067	,64	,91
6	40	,93	,267	,042	,84	1,01
7	40	,73	,452	,071	,58	,87
8	40	,88	,335	,053	,77	,98

Группы семян | Seed groups	Число семян в группе <i>n</i> | Number <i>n</i> of seeds in group	Степень прорастания семян на 30-й день, среднее значение в группе | 30-day germination degree for group, mean	Стандартное отклонение | Standard de- viation	Стандартная ошибка | Standard error	95 % доверительный интервал для среднего значения | 95 % confidence interval for the mean	
					Нижняя граница | Lower bound	Верхняя граница | Upper bound
9	40	,80	,405	,064	,67	,93
10	40	,73	,452	,071	,58	,87
11	40	,75	,439	,069	,61	,89
12	40	,88	,335	,053	,77	,98
13	40	,68	,474	,075	,52	,83
14	40	,80	,405	,064	,67	,93
15	40	,78	,423	,067	,64	,91
16	40	,95	,221	,035	,88	1,02
17	40	,88	,335	,053	,77	,98
18	40	,88	,335	,053	,77	,98
19	40	,75	,439	,069	,61	,89
20	40	,80	,405	,064	,67	,93
21	40	,78	,423	,067	,64	,91
22	40	,73	,452	,071	,58	,87
23	40	,73	,452	,071	,58	,87
24	40	,65	,483	,076	,50	,80
25	40	,70	,464	,073	,55	,85
26	40	,88	,335	,053	,77	,98
27	40	,73	,452	,071	,58	,87
28	40	,83	,385	,061	,70	,95
29	40	,70	,464	,073	,55	,85
30	40	,78	,423	,067	,64	,91
Всего	1200	,79	,411	,012	,76	,81

Сведения об авторах

Новиков Артур Игоревич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: arthur.novikov@vglta.vrn.ru.

Рибко Сергей Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесных культур и почвоведения, Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь; <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>, e-mail: rebko@belstu.by.

Новикова Татьяна Петровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

✉ *Петрищев Евгений Петрович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>, e-mail: petrishchev.vgltu@mail.ru.

Information about the authors

Arthur I. Novikov – Dr Sci. (Tech.), professor, Chair of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1230-0433>, e-mail: arthur.novikov@vglta.vrn.ru.

Siarhei U. Rabko – Cand. Sci. (Forestry), Docent, Head of the Department of Forest Crops and Soil Science, Educational Institution "Belarusian State Technological University", Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>, e-mail: rebko@belstu.by.

Природопользование

Tatyana P. Novikova – Cand. Sci. (Technical), Docent, Chair of Computer Technology and Microelectronic Engineering, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

✉ *Evgeniy P. Petrishchev* – Postgraduate Student (Tech.), Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1395-3631>, e-mail: petrishchev.vgltu@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/5>

УДК 630 : 621.865.8



Статическое нагружение силового гидропривода звеньев манипулятора лесотранспортной машины в критическом режиме

Ольга Р. Дорняк¹✉, ordornyak@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>

Людмила В. Маркова², l_v_markova@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3623-1594>

Сергей К. Попиков³, sergpopikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

Павел В. Танчук¹, pavlentpv@mail.ru <https://orcid.org/0000-0008-1357-2649>

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

²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, ул. П. Бровки, 15, г. Минск, 220072, Республика Беларусь

³Институт комплексного проектирования автомобильных дорог, ул. Депутатская, 11, г. Воронеж, 394055, Российская Федерация

Безопасные и эффективные режимы работы погрузочно-разгрузочной техники манипуляторного типа в лесном комплексе предполагают обязательное горизонтальное положение рамы лесотранспортной машины. В неблагоприятных производственных условиях лесотранспортная машина может оказаться в критической ситуации, связанной с поворотом рамы относительно горизонта. Коррекция такого положения может быть обеспечена за счет использования аутригеров или автоматических выравнивателей опорно-поворотных устройств. Для этого необходимо теоретическое исследование статических нагрузок, характерных для гидроцилиндров, аутригеров и других звеньев гидроманипулятора при различных конфигурациях. Для описания условий равновесия изучаемой механической системы «базовая лесотранспортная машина – аутригеры – стрела – рукоять с телескопическим удлинителем – устройство захвата – гидроприводы» использованы уравнения равновесия в обобщенных координатах. В качестве обобщенных координат выбраны угол поворота рамы опорно-поворотного устройства, угол поворота стрелы, угол поворота рукояти и удлинение её телескопической части. Аналитические выражения для усилий на штоках гидроцилиндров и значения давления рабочей жидкости в поршневых полостях гидроцилиндров в состоянии равновесия при различном положении звеньев манипулятора могут быть использованы при проектировании технологических режимов эксплуатации лесотранспортных машин. Особую значимость это приобретет для лесопромышленных предприятий при планировании операций погрузки-разгрузки сортиментов с возможностью выведения опорно-поворотного устройства в горизонтальное положение.

Ключевые слова: гидравлический манипулятор, лесотранспортная машина, аутригер, гидравлический цилиндр, математическая модель; опорно-поворотное устройство; горизонтальное (критическое) положение

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: 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>.


Поступила 25.04.2023. *Пересмотрена* 07.06.2023. *Принята* 15.06.2023. *Опубликована онлайн* 18.09.2023

Article

Static loading of the power hydraulic drive of the manipulator links of the timber transport machine in critical mode

Olga R. Dornyak¹ ✉, ordornyak@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>

Lyudmila V. Markova², l_v_markova@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3623-1594>

Sergey K. Popikov², popikovpetr@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>

Paul V. Tanchuk¹, pavlentpv@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0008-1357-2649>

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

²*Heat and mass transfer institute of the national academy of sciences of Belarus, Brovki str., 15, Minsk, 220072, Belarus*

³*Institute for Integrated Design of Highways, Deputatskaya str., 11, Voronezh city, 394055, Russian Federation,*

Abstract

The safe and effective modes of operation of handling equipment of the manipulator type for the forest complex assume a mandatory horizontal position of the frame of the mobile technological machine. In unfavorable production conditions, a forest transport machine may find itself in a critical situation associated with the rotation of the manipulator's support frame relative to the horizon. Correction of this situation can be provided through the use of outriggers. This paper presents the results of a theoretical study of static loads that are characteristic of hydraulic cylinders of outriggers and other elements of the hydraulic manipulator of a forest transport machine with its various configurations. Technologies for loading, moving and unloading forest cargoes can be carried out using special equipment, subject to certain rules. The safe and effective operation modes of manipulator handling equipment assume a mandatory horizontal position of the support-turntable. In unfavorable production conditions, the wood transport machine may find itself in a critical situation related to the rotation of the support and turning frame of the manipulator relative to the horizon. Correction of such position can be insured by use of outriggers. This paper presents the theoretical study results of the static loads, which are characteristic for the hydraulic cylinder of outrigger and other elements of the hydraulic manipulator of a timber transport machine in its various configurations. Balance equations in generalized coordinates are used to describe the equilibrium conditions of the mechanical system under study, which includes a basic vehicle, outriggers, a boom, a handle with a telescopic extension, a grip device and hydraulic drives that ensure their functioning. The rotation angle of support-turning frame in vertical plane, the boom rotation angle, the handle rotation angle and extension of the telescopic part are selected as generalized coordinates. Analytical expressions are obtained for forces on rods of hydraulic cylinders and the working fluid pressure values in piston cavities of hydraulic cylinders in equilibrium state at different position of manipulator links. Calculations based on the obtained formulas can be used in designing technological modes of operation of timber transport machines for carrying out loading and unloading operations of cargoes with the possibility of bringing the support-turntable into a horizontal position.

Keywords: *hydraulic manipulator, forest transport machine, outrigger, hydraulic cylinder, mathematical model*

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: Dornyak O.R., Markova L.V., Popikov S.K., Tanchuk P.V. (2023). Static loading of the power hydraulic drive of the manipulator links of the timber transport machine in critical mode. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 87-104 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/5>.

Received 25/04.2023. *Revised* 07.06.2023. *Accepted* 15.06.2023. *Published online* 18.09.2023.

Введение

Безопасные и эффективные режимы работы погрузочно-разгрузочной техники манипуляторного типа⁷ в лесном комплексе предполагают обязательное горизонтальное положение рамы мобильной транспортно-технологической машины [1]. Работа лесных машин часто осуществляется в неблагоприятных природно-климатических условиях [29], к числу которых относятся неоднородная податливость грунта, сложный профиль поверхности данной местности. В таких условиях возможны критические ситуации, связанные с наклоном рамы манипулятора.

Коррекция такого положения может быть обеспечена за счет использования аутригеров.

Аутригеры представляют собой выносные поворотные или выдвигные опоры с опорными винтовыми или гидравлическими домкратами⁸ (рис. 1) [2,3]. Выбор конструкции аутригера определяется массой базовой машины. При испытаниях легковых автомобилей на устойчивость используются аутригеры в виде балок, закрепляемых на заднем и переднем бамперах, или в виде рычажных конструкций, закреплённых на боковых частях кузова. Контактные слайдеры расположены на концах

балок [4]. Большинство современных лесотранспортных машин оснащены гидрофицированными аутригерами, конструктивно совмещенными с гидроцилиндрами, подключенными в общую гидравлическую схему машины [5].



Рисунок 1. Манипулятор Атлант-С 140-05 (Майкопский машиностроительный завод).

Аутригеры установлены в рабочем режиме

Источник: <https://img.bizorg.su/goods/190/157/1901579.jpg>

Figure 1. Manipulator Atlant-C 140-05 (Maikop Machine-building Plant). Outriggers are installed in working mode

Source:

<https://img.bizorg.su/goods/190/157/1901579.jpg>

⁷ Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: монография / З.К. Емтыль, И.М. Бартнев, М.В. Драпалок [и др.]; под ред. д-ра технических наук, проф. И.М. Бартнева. – М.: ФЛИНТА : Наука, 2011.- 408 с.

⁸ Александров М.П. Грузоподъемные машины / М.П. Александров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Высшая школа, 2000. – 552 с.

Способы выравнивания рамы манипуляторов постоянно совершенствуются. Авторы [5] обосновали эффективность дополнения аутригеров анкерными устройствами, которые снижают влияние на лесотранспортную машину опрокидывающих и сдвиговых эксплуатационных нагрузок. В [6] предложено устройство, повышающее устойчивость стрелового крана на слабонесущих грунтах за счет укладки специальной ленты и последующего наезда на нее ходового оборудования. Для того чтобы использовать кран на грунтах текучей и пластично-текучей консистенции, в работе [7] предлагается установка дополнительных опорных плит, опускаемых под аутригеры с помощью канатно-блочной системы.

С целью повышения производительности погрузочно-разгрузочных работ И.Р. Шегельманом и соавторами (2016)⁹ предложена конструкция автопоезда-сортиментовоза, где предусмотрено перемещение манипулятора вдоль кузова транспортного средства. Эта конструкция увеличивает обслуживаемую площадь с одной стоянки транспортного средства. При этом аутригеры, закрепленные на подвижной раме манипулятора [8], позволят жестко зафиксировать манипулятор относительно земли.

Процесс выравнивания опорно-поворотного устройства (ОПУ) с помощью аутригеров первоначально осуществлялся вручную, поэтому являлся достаточно трудоёмким и затратным по времени. В работах [9-11] предложен метод решения этой проблемы с использованием специально разработанных устройств автоматического выравнивания гидроманипулятора. Такие устройства защищены патентами РФ, их применение расширяет технологические возможности безопасного процесса погрузки лесоматериалов отечественными лесотранспортными машинами [12].

Для формирования эффективного управляющего воздействия для указанных устройств необ-

ходимы теоретические исследования динамики взаимодействия всех элементов машины¹⁰ в зависимости от широкого спектра конструктивных и режимных параметров [13]. Для обеспечения надежности работы лесотранспортной машины важно оценить величину давления рабочей жидкости в гидравлических цилиндрах аутригеров, стрелы, рукоятки и ее телескопической части.

Большинство исследований такого типа основано на построении математических моделей кинематики¹¹ и динамики¹³ механизмов в рамках закономерностей [14-16], разработанных в теоретической механике, теории машин и механизмов [17-20]. Также имеются публикации с результатами прочностных расчетов, выполненных для элементов гидроманипулятора лесотранспортной машины [5].

В работе Ф.Ф. Дахиева¹⁴ и соавторов (2015) рассмотрена динамика машины манипуляторного типа с четырьмя степенями свободы. Авторы исследовали шарнирно-сочлененный манипулятор, элементами которого являются колонна, стрела, телескопическая рукоятка, а также комплекс гидроцилиндров. Предполагается, что рама манипулятора стабильно занимает горизонтальное положение, так что работа аутригеров не рассматривается.

⁹ Шегельман И. Р., Скрыпник В. И., Кузнецов А. В., Васильев А. С. Оценка путей модернизации лесовозного автопоезда, оснащенного гидроманипулятором. *Фундаментальные исследования*. 2016; 12-4: 789-794. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27708160>.

¹⁰ 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

¹¹ Ермалицкий А. А., Клоков Д. В., Насковец М. Т. Математическое моделирование процессов погрузки пачек сортиментов и хлыстов колесным лесопогрузчиком с гидроманипулятором. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2005; 11: 8-12. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23757593>.

¹² Мохов С. Е., Арико С. Е., Лой В. Н. Кинематика харвестерного рычажного манипулятора параллельного типа. *Труды Белорусского государственного технологического университета*. Серия 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2008; 2: 47-51. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23834086>.

¹³ Скоробогатова Т. Е. Динамические нагрузки в конструкции лесопогрузчика в режиме поворота гидроманипулятора. *Вестник КрасГАУ*. 2006; 5: 412-415. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9253357>.

¹⁴ Дахиев Ф. Ф., Раевская Л. Т. Расчет обобщенных сил лесного манипулятора с четырьмя степенями свободы. *Современные проблемы науки и образования*. 2015; 1-1: 75. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25323100>.

Строго и последовательно изложены все шаги построения уравнений Лагранжа 2 рода применительно к динамическому процессу погрузки-разгрузки сортиров гидроманипулятором в рамках сделанных предположений.

Наличие звеньев с изменяющейся длиной [16] усложняет задачи кинематики и динамики манипулятора. Модель телескопического звена, предложенная в [21], состоит из двух абсолютно твердых инерционных участков, расположенных на концах звена и невесомого участка переменной длины, расположенного посередине звена.

Следует отметить, что результаты моделирования движения роботов различного назначения широко представлены в научной литературе. Основой математического описания являются классические принципы и уравнения механики. Для надежного функционирования манипуляционного устройства в переходных режимах требуется разработка алгоритма управления движением. Для конкретных видов манипуляторов предложены алгоритмы, обладающие свойством робастности по отношению к их инерционным параметрам [22].

Классические методы механики позволили разработать системы автоматизированного создания математических моделей для решения задач кинематики и динамики различных роботов и манипуляторов, которые успешно применяются многими исследователями [23-24]. Известный алгоритм Денавита-Хартенберга стал основой для ряда эффективных программных математических комплексов, предназначенных для проектирования и исследования робототехнических систем [25-26]. В работе [27] представлено решение задачи оптимального управления лесным гидравлическим манипулятором с 4 степенями свободы для минимизации затрат на энергопотребление привода удлинителя рукояти с использованием этого алгоритма. Значи-

тельный объем полевых экспериментов автора подтвердил прогнозируемое моделью снижение энергозатрат на 15-30%.

Целью данной работы является изучение интенсивности статического нагружения системы гидроцилиндров мобильной транспортно-технологической машины при различных положениях рамы опорно-поворотного устройства, стрелы и рукояти с телескопическим удлинителем.

Материалы и методы

Исследование процесса работы гидроманипулятора проводится методами аналитической механики. Расчетная схема для изучаемой механической системы представлена на рис. 2. В систему включены базовый автомобиль, рама опорно-поворотного устройства, поворотная колонна, стрела, рукоять, телескопический удлинитель рукояти, ауриггеры и гидроцилиндры.

Приняты следующие допущения. Все элементы механической системы считаются абсолютно твердыми. Груз, захваченный грейфером, движется поступательно в этой же плоскости. Процесс деформации грунта под лапами ауриггеров завершен, при этом рама лесотранспортной машины занимает наклонное положение к горизонту. Вес гидроцилиндров существенно меньше, чем вес других конструктивных элементов. Центр тяжести каждого элемента принадлежит оси симметрии этого элемента. Поворот колонны вокруг оси вращения не рассматривается. Движение колонны вместе с опорно-поворотным устройством, стрелы, рукояти и груза происходят в вертикальной плоскости за счет изменения длины правого ауриггера.

Рассматриваемая механическая система при указанном ограничении имеет 4 степени свободы. Наложённые механические связи являются идеальными голономными стационарными.

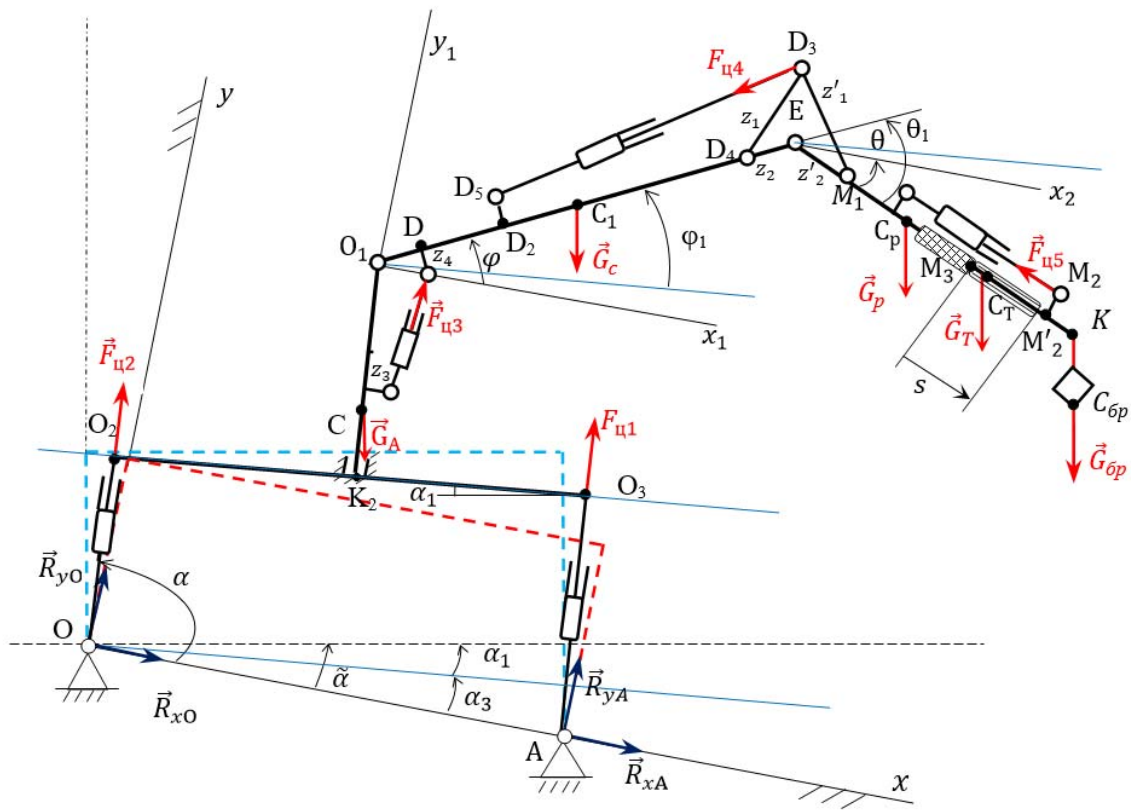


Рисунок 2. Расчетная схема. Конфигурация опорно-поворотного устройства в критическом положении - - - - -, в рабочем положении - - - - -, в произвольном положении - ——— .

Линии вида обозначают горизонтальное, а вида вертикальное направление.

Прямые вида параллельны раме опорно-поворотного устройства

Источник: Собственная композиция авторов

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

Для изучения состояния равновесия системы при различных положениях рамы опорно-поворотного устройства, стрелы, рукояти и телескопического удлинителя воспользуемся уравнениями в обобщенных координатах. Для равновесия данной механической системы необходимо и достаточно, чтобы все обобщенные силы равнялись нулю¹⁵ [28].

¹⁵ Яблонский А. А., Никифорова В. М. Курс теоретической механики. – СПб.: Издательство "Лань", 1998. – 768 с.

Условия равновесия механизма 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 аутиригера.

Дополнительно на рис. 2 показаны вспомогательные системы координат, оси которых параллельны неподвижным осям, а начало совпадает с центром соответствующего шарнира. Система осей O1X1Y1Z1 используется для описания положения

точек стрелы, $EX_2Y_2Z_2$ - для точек рукояти и телескопического удлинителя.

Приняты обозначения:

- α - угол поворота левого аутригера;
- $\tilde{\alpha}$ - угол между осью OX и горизонтом, характеризующий степень деформации грунта под правым аутригером;
- α_1 - угол между плоскостью рамы опорно-поворотного устройства и горизонтальной плоскостью;
- α_3 - угол между осью OX и линией O_2O_3 ;
- φ - угол между осью O_1X_1 и осью стрелы O_1E ;
- φ_1 - угол между проекцией плоскости рамы опорно-поворотного устройства на вертикальную плоскость и осью стрелы O_1E ;
- θ - угол между осью EX_2 и осью рукояти EM_2 ;
- θ_1 - угол осью рукояти EM_2 и осью стрелы O_1E ;
- s - величина телескопического удлинения M_2M_3 .

Центры тяжести отдельных элементов механической системы обозначены для автомобиля - C_A , для стрелы - C_1 , для рукояти - C_P , для телескопической части - C_T , для ротатора грейфера и груза сортиментов - C_{6p} . Соответствующие обозначения введены для сил тяжести этих элементов: $\vec{G}_A, \vec{G}_1, \vec{G}_P, \vec{G}_T, \vec{G}_{6p}$.

Кроме сил тяжести к внешним силам, действующим на механическую систему относятся силы давления, приложенные к штокам гидроцилиндров аутригеров $\vec{F}_{ц1}$ и $\vec{F}_{ц2}$, стрелы $\vec{F}_{ц3}$, рукояти $\vec{F}_{ц4}$, телескопического удлинителя $F_{ц5}$, а также реакции опор $\vec{R}_{OX}, \vec{R}_{OY}, \vec{R}_{AX}, \vec{R}_{AY}$.

В качестве обобщенных координат выбраны угол поворота рамы опорно-поворотного устройства в вертикальной плоскости α , угол поворота стрелы φ , угол поворота рукояти θ и удлинение телескопической части s (рис. 2).

Уравнения равновесия в обобщенных координатах имеют вид

$$Q_\alpha = 0, Q_\varphi = 0, Q_\theta = 0, Q_s = 0. \quad (1)$$

Здесь Q_i - обобщенная сила, соответствующая обобщенной координате q_i ($i=\alpha, \varphi, \theta, s$). Известно, что для вычисления обобщенной силы Q_i необходимо задать системе возможное перемещение, при котором $\delta q_i > 0$, при этом другие обобщенных q_j координаты не изменяются: $\delta q_j = 0$ ($j \neq i$). Затем вычисляется сумма элементарных работ всех внешних сил на данном перемещении δA_i . Обобщенная сила $Q_i = \delta A_i / \delta q_i$.

Вывод уравнений равновесия является достаточно громоздким, поэтому рассмотрим основные моменты указанного выше алгоритма.

1. Полагаем $\delta s > 0$, при этом $\delta \alpha = 0, \delta \varphi = 0, \delta \theta = 0$.

$$\delta A_s = \delta A(\vec{F}_{ц5}) + \delta A(\vec{G}_T) + \delta A(\vec{G}_{6p}).$$

Элементарная работа каждой из трех сил на данном перемещении вычисляется как скалярное произведение вектора силы \vec{F} на вектор элементарного перемещения точки ее приложения $\vec{\delta r}$.

$$\delta A(\vec{F}_{ц5}) = -F_{ц5} \delta s; \delta A(\vec{G}_T) = G_T \delta s \cos \gamma; \delta A(\vec{G}_{6p}) = G_{6p} \delta s \cos \gamma; \gamma = \frac{\pi}{2} + \theta - \alpha_1.$$

2. Полагаем $\delta \theta > 0$, при этом $\delta \alpha = 0, \delta \varphi = 0, \delta s = 0$.

$$\delta A_\theta = \delta A(\vec{F}_{ц4}) + \delta A(\vec{F}_{ц5}) + \delta A(\vec{G}_P) + \delta A(\vec{G}_T) + \delta A(\vec{G}_{6p}).$$

3. Полагаем $\delta \varphi > 0$, при этом $\delta \alpha = 0, \delta \theta = 0, \delta s = 0$.

$$\delta A_\varphi = \delta A(\vec{F}_{ц3}) + \delta A(\vec{F}_{ц4}) + \delta A(\vec{F}_{ц5}) + \delta A(\vec{G}_P) + \delta A(\vec{G}_T) + \delta A(\vec{G}_{6p}) + \delta A(\vec{G}_C).$$

4. Полагаем $\delta \alpha > 0$, при этом $\delta \varphi = 0, \delta \theta = 0, \delta s > 0$.

$$\delta A_\alpha = \delta A(\vec{F}_{ц1}) + \delta A(\vec{F}_{ц2}) + \delta A(\vec{F}_{ц3}) + \delta A(\vec{F}_{ц4}) + \delta A(\vec{F}_{ц5}) + \delta A(\vec{G}_P) + \delta A(\vec{G}_T) + \delta A(\vec{G}_{6p}) + \delta A(\vec{G}_C) + \delta A(\vec{G}_A).$$

Элементарная работа сил на каждом угловом перемещении вычисляется как произведение момента силы относительно соответствующей оси вращения на элементарный угол поворота. Для случая 2, ось вращения EZ_2 , для случая 3 - O_1Z_1 , для случая 4 - OZ . Момент силы \vec{F} относительно оси может быть вычислен с использованием векторного произведения радиуса вектора точки при-

ложения силы \vec{r} , на вектор силы \vec{F} . Вектор \vec{r} проводится из центра Е в случае 2, из центра O_1 в случае 3 и центра О в случае 4.

Поскольку наложенные на систему внешние связи считаются идеальными, в уравнения равновесия (1) не входят неизвестные реакции и эти уравнения могут быть использованы для поиска сил давления на штоках гидроцилиндров – значений

$$F_{ц1} = -\frac{1}{L \sin \alpha} \left\{ -\cos \alpha_1 (x_C G_A + x_{C_1} G_C + x_{C_P} G_P + x_{C_T} G_T + x_{6P} G_{6P}) - \sin \alpha_1 (y_C G_A + y_{C_1} G_C + y_{C_P} G_P + y_{C_T} G_T + y_{6P} G_{6P}) \right\} + F_{ц3} [x_D \sin \omega - y_D \cos \omega] + F_{ц4} [x_{D_3} \sin \beta_5 - y_{D_3} \cos \beta_5] + F_{ц5} [x_{M_2} \sin \omega - y_{M_2} \cos \omega]. \quad (2)$$

В выражении (2) L - расстояние между аутригерами; x_i, y_i – декартовы координаты точки приложения силы, $i = C, C_1, C_P, C_T, C_{D_3}, C_{M_2}, C_{6P}$.

$$F_{ц3} = -\frac{1}{[x_{1D} \sin \omega - y_{1D} \cos \omega]} \left\{ -\cos \alpha_1 (x_{1C_1} G_C + x_{1C_P} G_P + x_{1C_T} G_T + x_{16P} G_{6P}) - \sin \alpha_1 (y_{1C_1} G_C + y_{1C_P} G_P + y_{1C_T} G_T + y_{16P} G_{6P}) \right\} + F_{ц4} [x_{1D_3} \sin \beta_5 - y_{1D_3} \cos \beta_5] + F_{ц5} [x_{1M_2} \sin(\pi + \theta) - y_{1M_2} \cos(\pi + \theta)]. \quad (3)$$

Сила давления на штоке гидроцилиндра рукояти имеет вид:

$$F_{ц4} = -\frac{1}{[x_{2D_3} \sin \beta_5 - y_{2D_3} \cos \beta_5]} \left\{ -\cos \alpha_1 (x_{2C_P} G_P + x_{2C_T} G_T + x_{26P} G_{6P}) - \sin \alpha_1 (y_{2C_P} G_P + y_{2C_T} G_T + y_{26P} G_{6P}) \right\} + F_{ц5} [x_{2M_2} \sin(\pi + \theta) - y_{2M_2} \cos(\pi + \theta)]. \quad (4)$$

Сила давления на штоке гидроцилиндра стрелы выражается следующим образом:

$$F_{ц5} = -(G_T + G_{6P}) \sin(\theta - \alpha_1). \quad (5)$$

Выражения для вычисления координат точек приложения сил, используемых в уравнениях (2-5), при любом положении звеньев механизма приведены в прил. 1. В прил. 1 приведены также расчетные формулы для углов и других зависимых геометрических параметров, входящих в уравнения (2-5).

Метод исследования и результаты.

Система уравнений (2-5) позволяет выполнить последовательный расчет статических усилий, действующих на штоки гидроцилиндров манипулятора в допустимом диапазоне изменений каждой обобщенной координаты.

Анализ полученных выражений проведен применительно к возможному аналогу гидроманипулятора АТЛАНТ-С 90 (ЛВ 185-14), выпускаемому Майкопским машиностроительным заводом. Все вычисления проведены с помощью специальной программы для ЭВМ.

$F_{ц1}, F_{ц3}, F_{ц4}, F_{ц5}$. Отметим, что полученные выражения для обобщенных сил могут быть использованы для изучения динамики рассматриваемого манипулятора с учётом работы аутригеров при составлении уравнений Лагранжа 2-го рода.

Сила давления на штоке гидроцилиндра аутригера имеет вид:

Сила давления на штоке гидроцилиндра стрелы выражается следующим образом:

Геометрические константы модельного манипулятора представлены в прил. 2. Здесь же приведены значения массы отдельных элементов. Вес $\vec{G}_i = m_i \vec{g}$. Масса $m_A = m_{Авт} + m_K$.

Рис. 3-4 иллюстрируют зависимости давления в гидроцилиндрах манипулятора при различных положениях рамы, стрелы, рукояти и телескопического удлинителя. 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: $d_{ц1}=80$ мм, $d_{ц3}=140$ мм, $d_{ц4}=140$ мм, $d_{ц5}=63$ мм. Отрицательные значения давления указывают на противоположное направление соответствующего усилия на штоке по отношению к тому, которое показано на рис. 2.

Угол поворота рукояти относительно оси стрелы θ_1 изменяется от 0° до -90° . Расчеты выпол-

нены для случая полностью выдвинутого телескопического удлинителя: $s=1$ м.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости давления в гидроцилиндрах манипулятора от угла поворота стрелы относительно плоскости рамы φ_1 для случая, когда за счет, например, деформирования грунта слайсер правого аутригера занял положение А (рис. 2), так что угол $\alpha_1=15^\circ$. Угол φ_1 варьируется в диапазоне от -23° до $+80^\circ$ градусов.

Как видно из рис. 3, максимальные значения давления имеют место в гидроцилиндре аутригера. Графики на рис. 3, а указывают на опасные взаимные положения звеньев манипулятора. В условиях статического нагружения при выбранных значениях входных параметров давление $p_{ц1}$ может достигать нежелательных для работоспособности гидроцилиндра больших значений ~ 30 атм. Это происходит в предельно нижних положениях стрелы и рукояти.

Все зависимости для $p_{ц1}$ имеют минимум. Чем больше угол поворота рукояти $|\theta_1|$, тем при более высоком значении угла поворота стрелы достигается этот минимум. Вне зоны минимума, где давление в гидроцилиндре убывает, кривые, отвечающие разным положениям рукояти симбатны. При этом значения давлений $p_{ц1}$ в этой области практически одинаковы для $\theta_1=0^\circ$, -22.5° . Чем больше отклоняется рукоять от оси стрелы, тем более интенсивно нарастает давление жидкости в цилиндре аутригера. Для значений угла поворота стрелы выше, чем доставляющее минимум $p_{ц1}$, наблюдается немонотонный характер зависимости давления $p_{ц1}$ от угла поворота рукояти θ_1 .

Давление в гидроцилиндре стрелы $p_{ц3}$ при выбранных значениях входных параметров не превышает $8,5$ атм ($8,5$ МПа) в любом положении звеньев манипулятора (рис. 3, б). Максимальное значение давления $p_{ц3}$ смещается в зону больших зна-

чений угла поворота стрелы. Этот сдвиг тем значительнее, чем больше повернута рукоять (выше значение $|\theta_1|$).

Сравнивая кривые для давления в гидроцилиндрах стрелы и рукояти $p_{ц3}$ и $p_{ц4}$ на рис. 3б и 3с, можно сделать вывод об одинаковых качественных особенностях их изменения. При этом абсолютные значения давления в гидроцилиндре рукояти $p_{ц4}$ примерно в 2 раза ниже, чем в гидроцилиндре стрелы $p_{ц3}$.

Давление в гидроцилиндре телескопического удлинителя $p_{ц5}$ в рассматриваемых условиях невелико по абсолютной величине, при этом усилие в на штоке этого гидроцилиндра меняет свое направление, если положение рукояти соответствует $|\theta_1| < 22.5^\circ$ (рис. 3д). Следует также отметить симбатный характер зависимостей давления $p_{ц5}$ от угла поворота стрелы φ_1 при малых и средних значениях угла поворота рукояти $|\theta_1| < 45^\circ$.

На рис. 4 представлены расчетные зависимости давления в гидроцилиндрах манипулятора от угла наклона рамы опорно-поворотного устройства по отношению к горизонту α_1 . Угол α_1 варьировался в интервале (0° - 15°). Угол поворота стрелы относительно плоскости рамы φ_1 фиксирован в положении, параллельном раме ($\varphi_1=0$).

С увеличением угла наклона опорно-поворотного устройства возрастает давление в гидроцилиндрах аутригера $p_{ц1}$ и телескопического удлинителя $p_{ц5}$ (рис. 4а и 4д) и, наоборот, убывает давление в гидроцилиндрах стрелы $p_{ц3}$ и рукояти $p_{ц4}$ (рис. 4б и 4с).

Из рис. 4а видно, что характер всех кривых $p_{ц1}(\alpha_1)$ характеризуется симбатностью. То же самое заключение справедливо для зависимостей $p_{ц3}(\alpha_1)$, $p_{ц4}(\alpha_1)$, $p_{ц5}(\alpha_1)$, кроме тех, которые относятся либо к крайним нижним (рис. 4б-4с), либо крайним верхним положениям рукояти (рис. 4д).

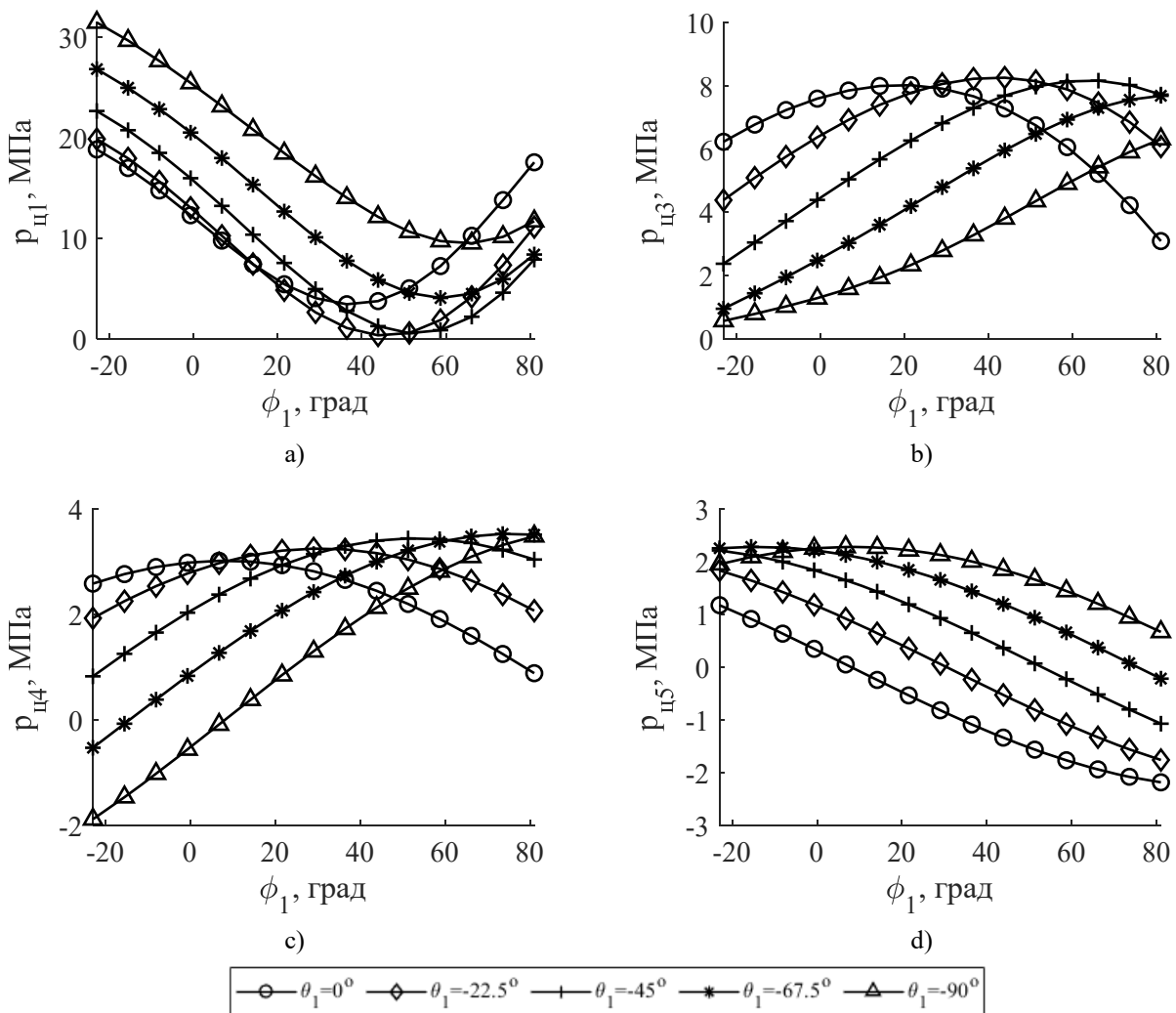


Рисунок 3. Значения давления в гидроцилиндрах 1 (для выдвижения аутригеров) – а) 3 (для изменения положения стрелы) – б); 4 (для изменения положения рукояти) – в); 5 (для выдвижения телескопической части) – г) при различных значениях углов наклона стрелы (ϕ_1) и рукояти (θ_1) при величине угла наклона рамы опорно-поворотного устройства гидроманипулятора $\alpha_1=15^\circ$. Длина выдвинутой телескопической части $s=1.0\text{ м}$

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 3. Pressure values in hydraulic cylinders 1 (for extending outriggers) – a) 3 (for changing the position of the boom) – б); 4 (for changing the position of the handle) – в); 5 (for extending the telescopic part) – г) at different values of the angles of inclination of the boom (ϕ_1) and the handle (θ_1) when the angle of inclination of the hydraulic manipulator frame is $\alpha_1=15^\circ$. The length of the extended telescopic part $s = 1.0\text{ m}$

Source: own calculations

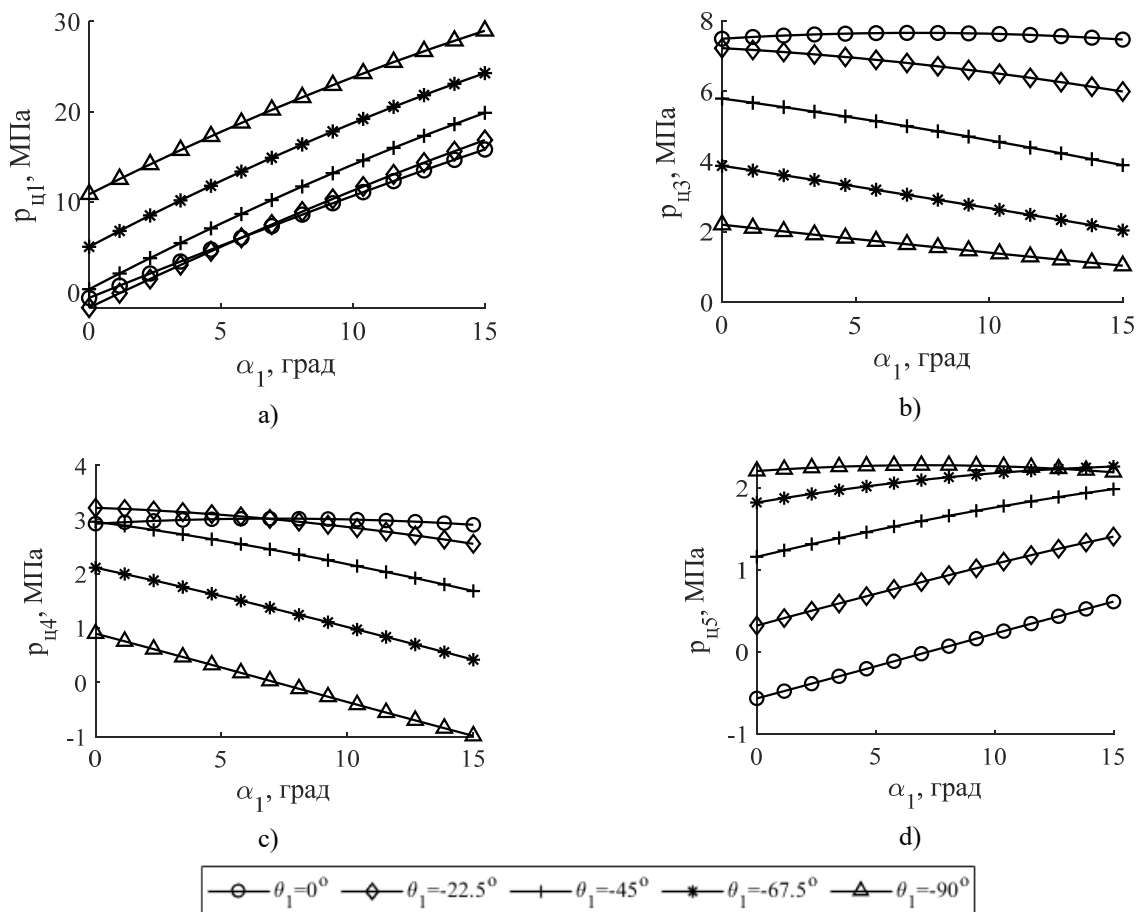


Рисунок 4. Значения давления в гидроцилиндрах 1 (для выдвижения аутригеров) – а) 3 (для изменения положения стрелы) – б); 4 (для изменения положения рукояти) – в); 5 (для выдвижения телескопической части) – г) при различных значениях углов наклона рамы опорно-поворотного устройства (α_1) и рукояти (θ_1) при величине угла наклона стрелы гидроманипулятора $\varphi_1=0^\circ$. Длина выдвинутой телескопической части $s=1.0$ м

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 4. Pressure values in hydraulic cylinders 1 (for extension of outriggers) – а) 3 (for changing the position of the boom) – б); 4 (for changing the position of the handle) – в); 5 (for extension of the telescopic part) – г) at different values of the tilt angles of the pivot frame (α_1) and the handle (θ_1) at the angle of inclination of the boom of the hydraulic manipulator $\varphi_1=0^\circ$. Length of the extended telescopic part $s=1.0$ m

Source: own calculations

Закключение

В работе получены аналитические выражения для усилий на штоках гидроцилиндров и значения давления рабочей жидкости в поршневых полостях этих гидроцилиндров в состоянии равновесия при различном положении звеньев манипулятора с четырьмя степенями свободы. Длины двух звеньев в разных положениях механизма изменяются. Расчетные формулы получены на основе уравнений равновесия в обобщенных координатах. Численный анализ зависимостей позволяет выявить взаимные положения звеньев манипулятора, кото-

рые характеризуются высоким давлением в стреловом гидроцилиндре, а также гидроцилиндрах рукояти, аутригера и телескопического удлинителя. Выражения (2-5) позволяют выполнить подбор гидроцилиндров, оптимальных по своим эксплуатационным характеристикам для осуществления операций погрузки-разгрузки сортиментов, а также прогнозировать в статическом приближении возможность безопасного выхода из критического режима манипулятора лесотранспортной машины с выведением в горизонтальное положение рамы опорно-поворотного устройства.

Приложение А. Координаты точек приложения сил в уравнениях (2-5). Выражения для определения зависимых геометрических параметров

Обозначения отрезков соответствуют рисунку 2.

$x_C = |OO_2|\cos \alpha + |O_2K_2|\cos \alpha_3 + |C_AK_2|\cos \alpha;$ $y_C = |OO_2|\sin \alpha + |O_2K_2|\sin \alpha_3 + |C_AK_2|\sin \alpha;$ $x_{O_1} = |OO_2|\cos \alpha + |O_2K_2|\cos \alpha_3 + |O_1K_2|\cos \alpha;$ $y_{O_1} = |OO_2|\sin \alpha + |O_2K_2|\sin \alpha_3 + |O_1K_2|\sin \alpha;$ $x_{C_1} = x_{O_1} + x_{1C_1}; y_{C_1} = y_{O_1} + y_{1C_1};$ $x_{C_P} = x_{O_1} + x_{1C_P}; y_{C_P} = y_{O_1} + y_{1C_P};$ $x_{C_T} = x_{O_1} + x_{1C_T}; y_{C_T} = y_{O_1} + y_{1C_T};$ $x_{C_{6P}} = x_{O_1} + x_{1C_{6P}}; y_{C_{6P}} = y_{O_1} + y_{1C_{6P}};$ $x_D = x_{O_1} + x_{1D}; y_D = y_{O_1} + y_{1D};$ $x_{D_3} = x_{O_1} + x_{1D_3}; y_{D_3} = y_{O_1} + y_{1D_3};$ $x_{M_2} = x_{O_1} + x_{1M_2}; y_{M_2} = y_{O_1} + y_{1M_2};$	$x_{1C_1} = |O_1C_1|\cos \varphi; y_{1C_1} = |O_1C_1|\sin \varphi;$ $x_{1C_P} = x_{2C_P} + |O_1E|\cos \varphi; y_{1C_P} = y_{2C_P} + |O_1E|\sin \varphi;$ $x_{1C_T} = x_{2C_T} + |O_1E|\cos \varphi; y_{1C_T} = y_{2C_T} + |O_1E|\sin \varphi;$ $x_{1C_{6P}} = x_{2C_{6P}} + |O_1E|\cos \varphi;$ $y_{1C_{6P}} = y_{2C_{6P}} + |O_1E|\sin \varphi;$ $x_{1D} = |O_1D|\cos \varphi; y_{1D} = |O_1D|\sin \varphi;$ $x_{1D_3} = |O_1D_4|\cos \varphi + |D_4D_3|\cos \beta_2;$ $y_{1D_3} = |O_1D_4|\sin \varphi + |D_4D_3|\sin \beta_2;$ $x_{1M_2} = x_{2M_2} + |O_1E|\cos \varphi;$ $y_{1M_2} = y_{2M_2} + |O_1E|\sin \varphi;$
$x_{2C_P} = |EC_P|\cos \theta; y_{2C_P} = |EC_P|\sin \theta;$ $x_{2C_T} = |EC_T|\cos \theta; y_{2C_T} = |EC_T|\sin \theta$ $|EC_T| = |EM_3| + s - T/2;$ $x_{2C_{6P}} = |EK|\cos \theta + |KC_{6P}|\cos \left(\frac{3\pi}{2} + \alpha_1\right);$ $y_{2C_{6P}} = |EK|\sin \theta + |KC_{6P}|\sin \left(\frac{3\pi}{2} + \alpha_1\right);$	$|EK| = |EM_3| + s + |M'_2K|;$ $x_{2M_2} = |EM'_2|\cos \theta + |M'_2M_2|\cos \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right);$ $y_{2M_2} = |EM'_2|\sin \theta + |M'_2M_2|\sin \left(\theta + \frac{\pi}{2}\right);$ $|EM'_2| = |EM_3| + s;$ $x_{2D_3} = |ED_3|\cos(\theta + \gamma_6); y_{2D_3} = |ED_3|\sin(\theta + \gamma_6);$
$\alpha_1 = \pi/2 + \tilde{\alpha} - \alpha; \alpha_3 = \tilde{\alpha} - \alpha_1;$ $\gamma_1 = \pi - \varphi + \theta; \theta < 0;$ $\gamma_6 = 2\pi - (\gamma_1 + \gamma_5);$ $\gamma_5 = \arcsin[z_1 \sin \beta_2 / |ED_3|];$ $|ED_3| = [z_1^2 + z_2^2 - 2z_1z_2 \cos \beta_2]^{1/2};$ $\gamma_4 = \arcsin(z'_2 \sin \gamma_1 / y_5);$ $\gamma_3 = \arcsin(z'_1 \sin \gamma_2 / y_5);$ $\gamma_2 = \arccos[(y_2 - y_1 - y_4 \cos \gamma_1) / (-y_3)];$ $y_1 = z_1^2 + z_1'^2; y_2 = z_2^2 + z_2'^2;$ $y_3 = 2z_1z_1'; y_4 = 2z_2z_2';$ $y_5 = [z_2^2 + z_2'^2 - 2z_2z_2' \cos \gamma_1]^{1/2}$ $\beta_5 = 2\pi - \beta_3 - \beta_4; \beta_4 = \pi - \varphi - \beta_2;$ $\beta_3 = \arcsin[|D_5D_4| / |D_5D_3| \sin(\pi - \beta_1 - \beta_2)];$ $\beta_2 = \gamma_3 - \gamma_4;$ $\beta_1 = \arcsin[|D_2D_5| / (|D_2D_5|^2 + |D_2D_4|^2)^{1/2}];$	$|D_5D_3| = [|D_5D_4|^2 + z_1^2 - 2|D_5D_4|z_1 \cos(\pi - \beta_1 - \beta_2)]^{1/2};$ $|D_5D_4| = [|D_2D_5|^2 + |D_2D_4|^2]^{1/2};$ $\omega = \pi/2 - (\delta - \alpha_3) + \varphi;$ $\delta = \pi/2 - \nu_5;$ $\nu_5 = \pi - \nu_4 - \nu_6;$ $\nu_6 = \arcsin(|O_1I_1| / |I_1I_2| \sin \nu_3);$ $|I_1I_2| = [|O_1I_1|^2 + |O_1I_2|^2 - 2|O_1I_1||O_1I_2| \cos \nu_3]^{1/2};$ $\nu_4 = \arcsin(|O_1C| / |O_1I_2|);$ $|O_1I_1| = (z_4^2 + |O_1D|^2)^{1/2};$ $|O_1I_2| = (z_3^2 + |O_1C|^2)^{1/2};$ $\nu_3 = \pi/2 + \varphi - \alpha_3 - \nu_1 - \nu_2;$ $\nu_2 = \arctg(z_3 / |O_1C|);$ $\nu_1 = \arctg(z_4 / |O_1D|);$

Приложение Б. Массовые и геометрические характеристики системы

Таблица Б.1

Массовые характеристики механической системы

Table B.1

Mass characteristics of the mechanical system

Обозначение	Параметр	Значение, кг
m_K	масса рамы, поворотной колонны гидроманипулятора, гидроцилиндра и механизма привода стрелы	1070
$m_{бр}$	масса бревен с грейфером и ротатором	575
m_C	масса стрелы с гидроцилиндром и механизмом привода рукояти	325
m_P	масса рукояти без телескопического удлинителя с гидроцилиндром привода телескопического удлинителя	225
m_T	масса телескопического удлинителя	150
$m_{авт}$	масса автомобиля	21000

Таблица Б.2

Геометрические характеристики механической системы. Обозначения отрезков соответствуют рис. 2

Table B.2

Geometric characteristics of the mechanical system. The segment designations correspond to Figure 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. Попиков, П. И. Повышение эффективности погрузочно-разгрузочных работ гидроманипуляторов лесотранспортных машин с выравнителями опорных платформ / П. И. Попиков, П. В. Танчук // Воронежский научно-технический вестник. – 2019. – Т. 4, № 4(30). – С. 95–100. – URL: <https://elibrary.ru/zlqwqi>.
2. Имитационная модель автомобильного манипулятора, реализованная в среде САПР / П. И. Попиков, В. А. Зеликов, К. А. Яковлев [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9, № 4 (36). – С. 142–150. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/16. – URL: <https://elibrary.ru/qwhvxf>.
3. Лагерев, А. В. Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов : Моделирование рабочих процессов и проектирование элементов гидропривода / А. В. Лагерев, И. А. Лагерев. – Брянск, 2019. – 201 с. – ISBN 978-5-9734-0319-5. – URL: <https://elibrary.ru/vleqjy>.
4. Проектирование аутригеров для испытаний устойчивости транспортных средств / В. Г. Крясков, А. С. Вашурин, А. В. Тумасов, А. А. Васильев // Фундаментальные исследования; 2017: 3. 40–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29007768>.
5. Лагерев, И. А., Лагерев 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. – URL: <https://elibrary.ru/yqibmt>.
6. Сладкова Л. А., Григорьев П. А., Крылов В. В. Моделирование усилий в опорах машин основного технологического назначения на примере стрелового самоходного крана. Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019; 4: 516-522. – DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-04-516-522. – URL: <https://elibrary.ru/lunhus>.
7. Селиверстов Г. В., Ситников С. В., Цолин А. С. Разработка конструкций аутригеров для работы автокранов в малосвязных грунтах. Механика XXI века. 2021; 20: 169-172. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46260333>.
8. Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator / S. Glushkov, A. Rybak, P. Popikov [et al.] // Forestry engineering journal. – 2021. – Vol. 11, No. 4(44). – P. 88-99. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8. – URL: <https://elibrary.ru/kjpbmt>.
9. Анализ работы гидравлического манипулятора лесной машины с цикловой системой управления / Е. Н. Власов, А. В. Сергеевичев, Ю. А. Добрынин, В. В. Сергеевичев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – № 238. – С. 99-112. – DOI 10.21266/2079-4304.2022.238.99-112. – URL: <https://elibrary.ru/bgxkeo>.
10. Попиков П. И., Юдин Р. В., Танчук П. В., Конюхов А. В. Математическая модель динамических режимов гидроманипуляторов лесотранспортных машин с выравнителями опорных платформ. Resources and Technology. 2021; 18(1): 140-155. – DOI 10.15393/j2.art.2021.5623.
11. Танчук П. В., Попиков П. И., Евсиков И. Д. Повышение устойчивости лесотранспортных машин при применении выравнителей опорно-поворотных устройств гидроманипуляторов // Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития. – Воронеж, 2022: 62-68. – DOI 10.58168/MFCCPTD2022_62-68.
12. 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".

13. Improved inverse kinematics and dynamics model research of general parallel mechanisms / X. Zhang, H. Wang, Y. Rong et al. // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2023. – Vol. 37. – № 2. – P. 943–954. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0134-1>.
14. Лагереv И. А., Остроухов И. О., Химич А. В. Компьютерное моделирование процесса потери общей устойчивости мобильной машины, оснащенной стреловой манипуляционной системой. 2019; 1: 83-94. – DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-01-83-94. – URL: <https://elibrary.ru/ihfpoq>.
15. Голякевич С. А. Гороновский А. Р., Мохов С. П. Результаты имитационного моделирования работы гидравлической системы форвардера в MATLAB / Simulink / Simscape. Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019; 1(216): 126–131. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36955660>.
16. Zhou, H. A practical method for the deformation of long-stroke hydraulic manipulators in grasping-handling tasks / H. Zhou, X. Zhang, J. Liu // *Journal of Field Robotics*. – 2023. – Vol. 40. – № 4. – P. 862–878. – DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.22160>.
17. Vihonen, J. Joint-Space Kinematic Model for Gravity-Referenced Joint Angle Estimation of Heavy-Duty Manipulators / J. Vihonen, J. Mattila, A. Visa // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2018. – Vol. 66. – № 12. – P. 3280-3288. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2749918>.
18. Hierarchical Decoupling Controller With Cylinder Separated Model of Hydraulic Manipulators for Contact Force/Motion Control / J. Shen, J. Zhang, H. Zong et al. // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. – 2023. – Vol. 28. – № 2. – P. 1081-1092. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3213582>.
19. Reducing Amplitude of Load Swinging During Operation of Hydraulic Manipulators of Forest Transport Machines / M. Drapalyuk [et al.] // *International Conference on Industrial Engineering*. Springer, Cham, 2020. P. 595-608. DOI:10.1007/978-3-030-22063-1_63.
20. Модель определения времени наведения захватно-срезающего устройства валочно-пакетирующих машин на растущее дерево / А. В. Андронов, И. А. Зверев, О. А. Михайлов, Г. С. Тарадин // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2021. – № 237. – С. 183-195. – DOI 10.21266/2079-4304.2021.237.183-195. – <https://elibrary.ru/gnazvg>.
21. Борисов А. В., Филиппенков К. Д. Моделирование движения звена переменной длины робота-манипулятора с использованием электроприводов. Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2021; 9-10(159-160): 19-26. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47112565>.
22. Алхаддад М. Моделирование и управление движением манипулятора с замкнутой кинематической цепью и линейным приводом. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2021; 3: 168-176. – DOI 10.31857/S0002338821020025.
23. Zhang Y., Ding W., Deng H. Reduced Dynamic Modeling for Heavy-Duty Hydraulic Manipulators with Multi-Closed-Loop Mechanisms. *IEEE Access*. 2020; 8: 101708-101720. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998058.
24. Hoang, D. Adaptive cooperation of optimal linear quadratic regulator and lumped disturbance rejection estimator-based tracking control for robotic manipulators / D. Hoang, N.T. Pham, X.H. Le et al. // *International Journal of Dynamics and Control*. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40435-023-01144-2>.
25. Yan Ch., Shi K., Zhang H., Yao Y. Simulation and analysis of a single actuated quadruped robot. *Mechanical Sciences*. 2022. 13:137-146. DOI 10.5194/ms-13-137-2022.
26. Дуюн И.А., Горлов А.С., Дуюн Т.А. Совместное моделирование движения параллельного манипулятора с использованием Adams-Matlab. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022; 11: 108–119. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-108-119.

27. Nurmi J., Mattila, J. Global Energy-Optimal Redundancy Resolution of Hydraulic Manipulators: Experimental Results for a Forestry Manipulator. *Energies*. 2017; 10(5): 647. DOI:10.3390/en10050647.

28. Jung, S. Improvement of Tracking Control of a Sliding Mode Controller for Robot Manipulators by a Neural Network / S. Jung // *International Journal of Control, Automation and Systems*. – 2018. – Vol. 16. – № 2. – P. 937-943. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0186-z>.

29. Бартенеv, И. М. Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин / И. М. Бартенеv, Е. В. Поздняков // *Лесотехнический журнал*. – 2013. – № 3 (11). – С. 114–123. – <https://elibrary.ru/rqqpeb>.

References

1. Popikov, P. I. Improving the efficiency of loading and unloading operations of hydraulic manipulators of forest transport machines with levelers of support platforms / P. I. Popikov, P. V. Tanchuk // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. – 2019. – Vol. 4, No. 4(30). – P. 95-100. – URL: <https://elibrary.ru/zlqwqi>.

2. Simulation model of an automobile manipulator implemented in a CAD environment / P. I. Popikov, V. A. Zelikov, K. A. Yakovlev [et al.] // *Forestry Journal*. – 2019. – Vol. 9, No. 4(36). – pp. 142-150. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/16. – URL: <https://elibrary.ru/qwhvxf> (In Russian).

3. Lagerev, A.V. Modern theory of manipulation systems of mobile multipurpose transport and technological machines and complexes: Modeling of work processes and design of hydraulic drive elements / A. V. Lagerev, I. A. Lagerev. – Bryansk, 2019. – 201 p. – ISBN 978-5-9734-0319-5. (In Russian). – URL: <https://elibrary.ru/vleqjy>.

4. Proektirovanie autrigrerov dlya ispytaniy ustojchivosti transportnyh sredstv / Kryaskov V. G., Vashurin A. S., Tumasov A. V., Vasil'ev A. A. *Fundamental'nye issledovaniya*; 2017: 3. 40-47. (In Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29007768>.

5. Lagerev I. A., Lagerev A. V. Povyshenie bezopasnosti ekspluatatsii mobil'nyh transportno-tekhnologicheskikh mashin s manipulyacionnymi sistemami pri rabote s autrigrerami. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017; 3: 296-302. (In Russian). – DOI 10.22281/2413-9920-2017-03-03-296-302.

6. Sladkova L. A., Grigor'ev P. A., Krylov V. V. Modelirovanie usilij v oporah mashin osnovnogo tekhnologicheskogo naznacheniya na primere strelovogo samohodnogo krana. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2019; 4: 516-522. (In Russian). – DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-04-516-522.

7. Seliverstov G. V., Sitnikov S. V., Colin A. S. Razrabotka konstrukcij autrigrerov dlya raboty avtokranov v malosvyaznyh gruntah. *Mekhaniki XXI veku*. 2021; 20: 169-172. (In Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46260333>.

8. Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator / S. Glushkov, A. Rybak, P. Popikov [et al.] // *Forestry engineering journal*. – 2021. – Vol. 11, No. 4(44). – P. 88-99. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/kjpbmt>.

9. Analysis of the operation of a hydraulic manipulator of a forest machine with a cyclic control system / E. N. Vlasov, A.V. Sergeevichev, Yu. A. Dobrynin, V. V. Sergeevichev // *Izvestia of the St. Petersburg Forestry Technical Academy*. – 2022. – No. 238. – pp. 99-112. – DOI 10.21266/2079-4304.2022.238.99-112. – Access mode: <https://elibrary.ru/bgxkeo>.

10. Popikov P. I., YUdin R. V., Tanchuk P. V., Konyuhov A. V. Matematicheskaya model' dinamicheskikh rezhimov gidromanipulyatorov lesotransportnyh mashin s vyravnivatelyami opornyh platform. *Resources and Technology*. 2021; 18(1): 140-155. – DOI 10.15393/j2.art.2021.5623.

11. Tanchuk P. V., Popikov P. I., Evsikov I. D. Povyshenie ustojchivosti lesotransportnyh mashin pri primenenii vyravnivatelej oporno-povorotnyh ustrojstv gidromanipulyatorov. *Sovremennyj lesnoj kompleks strany: problemy i trendy razvitiya: Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Voronezh, 07 oktyabrya 2022 goda* /

Otv. redaktor A.A. Platonov. – Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova; 2022: 62-68. (In Russian). – DOI 10.58168/MFCCPTD2022_62-68.

12. Patent № 2762905 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK B66C 23/80, B66C 13/18, A01G 23/00. Gidrosistema mekhanizma vyravnivaniya oporno-povorotnogo ustrojstva gidromanipulyatora lesotransportnoj mashiny : № 2021116628 : zayavl. 07.06.2021 : opubl. 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 "Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet imeni G.F. Morozova".

13. Dobrachev A. A., Raevskaya L. T., SHvec A. V. Kinematicheskie skhemy, struktury i raschet parametrov lesopromyshlennyh manipulyatornyh mashin : monografiya. – Ekaterinburg : federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Ural'skij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet", 2014: 128. – ISBN 978-5-94984-450-2. (In Russian).

14. Lagerev I. A., Ostrouhov I. O., Himich A. V. Komp'yuternoe modelirovanie processa poteri obshchej ustojchivosti mobil'noj mashiny, osnashchennoj strelovoj manipulyacionnoj sistemoj. 2019; 1: 83-94. (In Russian). – DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-01-83-94.

15. Golyakevich S. A. Goronovskij A. R., Mohov S. P. Rezul'taty imitacionnogo modelirovaniya raboty gidravlicheskoj sistemy forvardera v MATLAB / Simulink / Simscape. Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe hozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemyh resursov. 2019; 1(216): 126-131. (In Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36955660>.

16. Zhou, H. A practical method for the deformation of long-stroke hydraulic manipulators in grasping-handling tasks / H. Zhou, X. Zhang, J. Liu // Journal of Field Robotics. – 2023. – Vol. 40. – № 4. – P. 862-878. – DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.22160>.

17. Vihonen, J. Joint-Space Kinematic Model for Gravity-Referenced Joint Angle Estimation of Heavy-Duty Manipulators / J. Vihonen, J. Mattila, A. Visa // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2018. – Vol. 66. – № 12. – P. 3280-3288. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2017.2749918>.

18. Shen, J. Hierarchical Decoupling Controller With Cylinder Separated Model of Hydraulic Manipulators for Contact Force/Motion Control / J. Shen, J. Zhang, H. Zong et al. // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2023. – Vol. 28. – № 2. – P. 1081-1092. – DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3213582>.

19. Popikov P., Drapalyuk M., Druchinin D. Reducing Amplitude of Load Swinging During Operation of Hydraulic Manipulators of Forest Transport Machines. International Conference on Industrial Engineering. Springer, Cham, 2020. P. 595—608. DOI:10.1007/978-3-030-22063-1_63.

20. A model for determining the time of guidance of a grabbing-cutting device of felling-packing machines on a growing tree / A.V. Andronov, I. A. Zverev, O. A. Mikhailov, G. S. Taradin // Izvestiya of the St. Petersburg Forestry Academy. - 2021. – No. 237. – pp. 183-195. – DOI 10.21266/2079-4304.2021.237.183-195. – <https://elibrary.ru/gnazvvg>.

21. Borisov A. V., Filippenkov K. D. Modelirovanie dvizheniya zvena peremennoj dliny robota-manipulyatora s ispol'zovaniem elektroprivodov. Voprosy oboronnoj tekhniki. Seriya 16: Tekhnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2021; 9-10(159-160): 19-26. (In Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47112565>.

22. Alhaddad M. Modelirovanie i upravlenie dvizheniem manipulyatora s zamknutoj kinematicheskoj cep'yu i linejnym privodom. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya. 2021; 3: 168-176. (In Russian). – DOI 10.31857/S0002338821020025.

23. Zhang Y., Ding W., Deng H. Reduced Dynamic Modeling for Heavy-Duty Hydraulic Manipulators with Multi-Closed-Loop Mechanisms. IEEE Access. 2020; 8: 101708-101720. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998058.

24. Hoang, D. Adaptive cooperation of optimal linear quadratic regulator and lumped disturbance rejection estimator-based tracking control for robotic manipulators / D. Hoang, N.T. Pham, X.H. Le et al. // International Journal of Dynamics and Control. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40435-023-01144-2>.

25. Yan Ch., Shi K., Zhang H., Yao Y. Simulation and analysis of a single actuated quadruped robot. Mechanical Sciences. 2022. 13:137-146. DOI 10.5194/ms-13-137-2022.

26. Duyun I.A., Gorlov A.S., Duyun T.A. Sovmestnoe modelirovanie dvizheniya parallel'nogo manipulyatora s ispol'zovaniem Adams-Matlab. Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2022; 11: 108–119. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-108-119. (In Russian).

27. Nurmi J., Mattila, J. Global Energy-Optimal Redundancy Resolution of Hydraulic Manipulators: Experimental Results for a Forestry Manipulator. Energies. 2017; 10(5): 647. DOI:10.3390/en10050647.

28. Jung, S. Improvement of Tracking Control of a Sliding Mode Controller for Robot Manipulators by a Neural Network / S. Jung // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2018. – Vol. 16. – № 2. – P. 937-943. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0186-z>.

29. Bartenev, I. M. The wearing capacity of soils and its effect on the durability of working bodies of tillage machines / I. M. Bartenev, E. V. Pozdnyakov // Forestry Engineering Journal. – 2018. – № 3(11). – P. 114-123. – <https://elibrary.ru/rqqpeb> (in Russian).

Сведения об авторах

✉ *Дорняк Ольга Роальдовна* – доктор техн. наук, зав. кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>; e-mail: 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

Попиков Сергей Константинович – Институт комплексного проектирования автомобильных дорог, ул. Депутатская, 11, г. Воронеж, Российская Федерация, 394055, <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>; e-mail: sergropikov@mail.ru

Танчук Павел Владимирович – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: pavlentpv@mail.ru

Information about authors

✉ *Dorniyak Olga Roaldovna* – Dr. Sci. in Technical, Head of the department of electrical equipment, heating engineers and hydraulics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3714-8167>; e-mail: ordornyak@mail.ru

Markova Ludmila Vasilyevna - candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher of Rheo-physics 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

Popikov Sergey Konstantinovich - Head of the group, Institute for Integrated Design of Highways, Deputatskaya str., 11, Voronezh, Russian Federation, 394055, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, sergpopikov@mail.ru

Tanchuk Pavel Vladimirovich – Postgraduate student, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; e-mail: pavlentpv@mail.ru

Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6>


УДК 630*233



Программное обеспечение для управления системой технического обслуживания и ремонта лесных машин: оценка применимости

Анатолий Н. Заикин¹, zaikin.anatolij@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

Владимир В. Сиваков¹, sv@bgitu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Татьяна П. Новикова², novikova_tp.vglta@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Владимир А. Зеликов², zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Владимир В. Стасюк ², stasiuk.volodya@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-8689-955X>

Алексей С. Чуйков³, offlex88@belstu.by  <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

¹ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», пр. Станке Димитрова, 3, г. Брянск, 241037, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

³Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

Современные предприятия лесного комплекса являются сферой производства, в которую для повышения эффективности все активнее внедряются информационные технологии. Для повышения эффективности технического обслуживания и ремонта лесных машин для лесопромышленных и лесохозяйственных производств необходимо оценить возможность применения специализированного программного обеспечения в лесохозяйственных и лесозаготовительных производствах. Для сравнения функциональных возможностей и возможностей развертывания рассмотрены различные программы отечественных и иностранных производителей, используемые как для автоматизации ремонтных работ, так и для управления техническим обслуживанием и ремонтом. Проведена сравнительная оценка сходства и различия программных продуктов, базирующаяся на кластерном анализе бинарных данных, интерпретированных методом межгрупповых связей с использованием меры Жаккара. В силу специфики лесохозяйственных предприятий (лесные машины находятся на значительном удалении от сервисной базы) для мониторинга технического состояния необходимо, чтобы лесные машины были оборудованы диагностической системой и средствами передачи данных. При выборе же конкретного программного обеспечения необходимо опираться на такие параметры, как размер предприятия лесного комплекса, его потребности, финансовые возможности. Программное обеспечение должно встраиваться в единое информационное пространство, позволяющее применить технологию цифровых двойников.

Ключевые слова: программное обеспечение, лесные машины, техническое обслуживание и ремонт, лесной комплекс, лесовосстановительные работы, лесозаготовки, информационное пространство.

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: Программное обеспечение для управления системой технического обслуживания и ремонта лесных машин: оценка применимости / А. Н. Заикин, В. В. Сиваков, Т. П. Новикова, В. А. Зеликов, В. В. Стасюк, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 105–127. – Библиогр.: с. 117–126 (69 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6>.


Поступила 17.06.2023. *Пересмотрена* 11.08.2023. *Принята* 12.08.2023. *Опубликована онлайн* 18.09.2023.


Review



Software for managing of maintenance and repair system of forest machines: assessment of applicability

Anatolii N. Zaikin¹, zaikin.anatolij@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

Vladimir V. Sivakov¹, sv@bgitu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Tatyana P. Novikova², novikova_tp.vglta@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Vladimir A. Zelikov², zelikov-vrn@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2317-9413>

Vladimir V. Stasyuk²  stasiuk.volodya@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-8689-955X>

Alexey S. Chuikov³, offlex88@belstu.by  <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

¹*Bryansk State Engineering and Technological University, 3 Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation*

²*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva street, Voronezh, 394087, Russian Federation*

³*Belarussian State Technological University, 13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus*

Abstract

Modern enterprises of the forest complex are a sphere of production, in which information technologies are increasingly being introduced to increase efficiency. To improve the efficiency of maintenance and repair of forest machines for forestry and forestry industries, it is necessary to evaluate the possibility of using specialized software in forestry and logging industries. To compare the functionality and deployment capabilities, various programs of domestic and foreign manufacturers are considered, used both for automating repair work and for managing maintenance and repair. A comparative assessment of the similarities and differences of software products based on cluster analysis of binary data interpreted by the method of intergroup relations using the Jaccard measure is carried out. Due to the specifics of forestry enterprises (forest machines are located at a considerable distance from the service base), in order to monitor the technical condition, it is necessary that forest machines be equipped with a diagnostic system and data transmission facilities. When choosing a specific software, it is necessary to rely on such parameters as the size of the enterprise of the forest complex, its needs, financial capabilities. The software should be integrated into a single information space that allows the use of digital twin's technology.

Keywords: *software, forest machines, maintenance and repair, forest complex, reforestation, logging, information space.*

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: Zaikin A. N., Sivakov V. V., Novikova T. P., Zelikov V. A., Stasyuk V. V., Chuikov A. S. Software for managing the system of maintenance and repair of forest machines: assessment of applicability (2023). *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 105-127 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/6>.

Received 17.06.2023. *Revised* 11.08.2023. *Accepted* 12.08.2023. *Published online* 18.09.2023.

Введение

Современные предприятия, осуществляющие заготовку и переработку древесины, как правило, являются комплексными. Кроме основных работ, связанных с заготовкой и обработкой [31;33] лесоматериалов, предприятия проводят работы по лесовосстановлению [48;54], строительству и содержанию дорог и другие сопутствующие работы. Эти предприятия при выполнении всех операций производственного процесса вынуждены использовать транспортно-технологические машины и оборудование различного назначения. Машины и оборудование для лесосечных работ (харвестеры, форвардеры, скиддеры, валочно-пакетирующие машины, машины для обрезки ветвей [19] и др.); вывозки заготовленного леса (автопоезда на базе тягачей типа Урал, КаМАЗ, МАЗ, транспортно-грузовые дирижабли [50] и др.); лесовосстановления (машины для обработки семян [39;40;43;44], машины для подготовки почвы [42], сеялки [41;46;53], лесопосадочные [37;38], лесопожарные [20;21] машины); дорожного строительства (бульдозеры, автогрейдеры, экскаваторы и др.) предприятия покупают у различных дилеров. Отмеченные машины являются сложными техническими системами [58] с современной электронной компонентной базой [45;47;60] и средствами ее разработки [61;63], требуют регулярной оценки эксплуатационной технологичности [52], регулярного технического обслуживания и ремонта, от их технического состояния и оптимального распределения работ ТО и Р по исполнителям [58;59], использовании оптимальных алгоритмов для логистики запасных частей [1;57] технического обслуживания и ремонта зависит качество и эффективность лесохозяйственного и лесопромышленного производств [1]. А.С. Гурский и В.С. Ивагшко (2020), отмечают, что «для решения

проблемы контроля за состоянием лесных машин была создана система планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта» [7] (ППТО, ППП), а также ряд других систем – ориентированные на надежность (RCM); обслуживание, ориентированное на предотвращение рисков (RBI); ремонт по состоянию [2,3].

Каждая из систем имеет свои достоинства и недостатки [4], при этом авторы предлагают в качестве основной системы, например, для строительно-дорожных машин применить систему «ремонт по состоянию», что требует большой диагностической базы и подготовленного персонала [5,6].

Необходимо отметить, что в условиях реального производственного предприятия задача поддержания работоспособности машин и оборудования является сложно реализуемой вследствие необходимости учета большого числа факторов, учитывающих как условия работы, так и их реальное техническое состояние, поэтому в настоящее время предлагается более широко применять информационные технологии [55], телематику и дистанционную диагностику [7], методы имитационного моделирования работы оборудования [8, 9] и другие.

Область функционирования предприятия вносит свои требования обеспечения эффективности работы машин и оборудования. Например, для лесозаготовительных, лесохозяйственных предприятий характерно использование лесных машин, которые эксплуатируются на значительных удалениях от сервисной базы предприятий, поэтому проведение мероприятий в рамках технических обслуживаний, в том числе ежесменных, на самом предприятии затруднено, большинство операций проводятся оператором (водителем), что может привести к некачественному обслуживанию или же вовсе к его пропуску вследствие слабого контроля прово-

димых мероприятий. Такая ситуация ведет к ускорению изнашивания [51] узлов и агрегатов [49] машин, быстрому выходу их из строя, что приводит к вынужденным простоям и ремонтам.

При необходимости проведения планового технического обслуживания, а также ремонта, на место работы или стоянки техники выезжает мобильная ремонтная бригада, как правило, официального дилера [64], вследствие того, что техника сложная и требует соответствующего уровня квалификации персонала, оригинальных запчастей и технологических жидкостей. Широкое применение электронных систем также обуславливает необходимость их диагностирования и настройки, для чего нужно фирменное диагностическое оборудование и сканеры, доступ к порталу с технической информацией производителя машины, что также возможно только для официальных дилеров

В связи с цифровизацией экономики [10, 11] и переходом на новый технологический уклад [12, 13, 14] особую значимость приобретает задача широкого внедрения цифровых двойников, позволяющих создать цифровую копию физических объектов и, посредством технологии «Интернета вещей» [15, 16], получать информацию о состоянии объекта в режиме реального времени.

Усложнение техники, ее компьютеризация [17] приводит к повышению расходов на ТО и Р, потерям, связанным с простоями оборудования, поэтому, для их снижения, разработано специализированное программное обеспечение, применяемое как для автоматизации ремонтных работ на предприятии (в основном, относится к специализированным сервисным предприятиям), так и организации процесса ТО и Р (рис. 1, 2), которые должны работать в рамках единой цифровой модели.

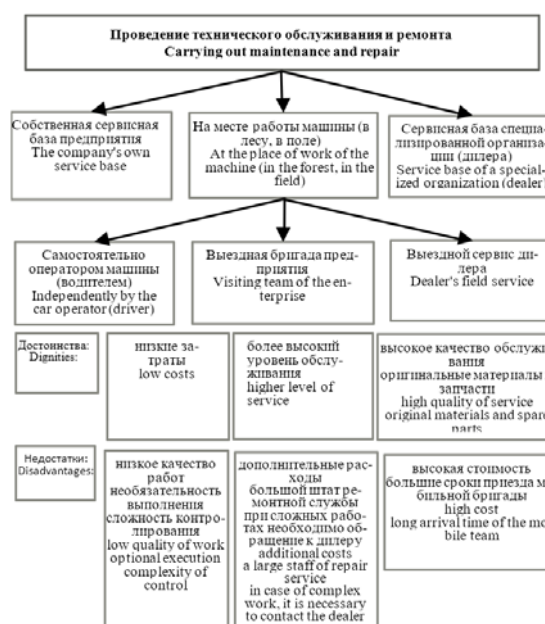


Рисунок 1. Возможность проведения ТО и Р
 Источник: Собственная схема авторов
 Figure 1. Possibility of maintenance and Repair
 Source: Authors' own scheme



Рисунок 2. Специализированное программное обеспечение ремонтных работ
 Источник: Собственная схема авторов
 Figure 2. Specialized repair software
 Source: Authors' own scheme

Цель данной работы – оценка применимости программного обеспечения для управления системой технического обеспечения и ремонта на предприятиях лесного комплекса, которые эксплуатируют транспортно-технологические машины.

Материалы и методы

Объект исследования

Программные продукты, используемые как при автоматизации ремонтных работ на предприятиях лесного комплекса, так и управлении техническим обслуживанием и ремонтом лесных машин.

Сбор данных

Проводили систематический поиск, используя базы данных ELibrary.ru и LENS, формированием следующих алгоритмов запроса:

1. [Scholar Query = "программные продукты | Software" AND "автоматизация ремонтных работ | automation of repair work" | Filters: Published Date = (2013-01-01 - 2023-05-01)] для предприятия, специализированного на сервисном обслуживании;

2. [Scholar Query = "Техническое обслуживание и ремонт | maintenance and repair" AND "системы управления | management system" | Filters: Published Date = (2013-01-01 - 2023-05-01)] на предприятии для управления собственной сервисной службой.

Анализ данных

По аналогии с А.Н. Заикиным и соавторами (2022), «из систематического поиска были отобраны наиболее часто применяемые программные продукты и оценена в программном обеспечении для статистических вычислений SPSS Statistics v25 степень их сходства и различия по параметрам» [17]: уровня их применения, модульности построения, развертывания, функциональных возможностей, а также возможности реализации технологии

интернета вещей. Визуализацию оценочных данных осуществляли диаграммой, по оси абсцисс которой откладывали меру Жаккара (Jaccard) для бинарных данных (0 – отсутствие; 1 – наличие), вычисленную по методу межгрупповой связи, а по оси ординат – критерии оценки (см. табл. 2 и 3).

Результаты и обсуждение

В целом, для организации ремонта лесных машин на предприятиях лесного комплекса применяется следующее специализированное программное обеспечение:

- каталоги запчастей, основанные на визуализации конструкции машины и входящих в них деталей (как правило, для создания применяются CAD программы);
- нормы времени на выполнение ремонтных работ (базы данных);
- технология проведения диагностирования и ремонта (базы данных);
- программы для автоматизации организации производственных процессов на предприятии (интегрируют данные из всех перечисленных отдельных источников и направлены на автоматизацию деятельности) (рис. 3).

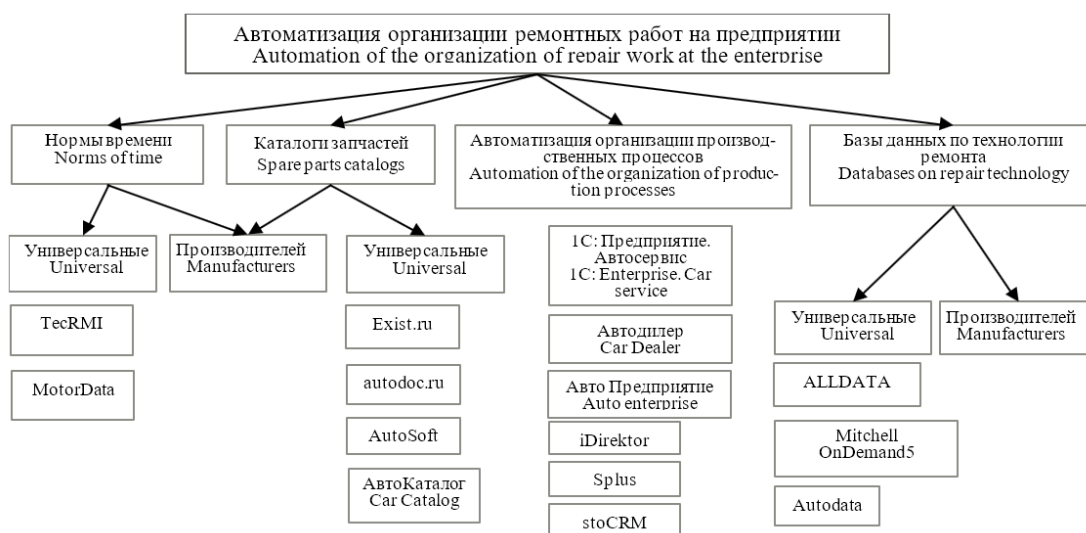


Рисунок 3. Специализированное программное обеспечение, применяемое для автоматизации деятельности участка ТО и Р лесохозяйственных, лесозаготовительных и лесоперерабатывающих производств
Figure 3. Specialized software used to automate the activities of the M&R site of forestry, logging and timber processing industries

Источник: Собственная схема авторов
Source: Authors' own scheme

Представленные на рис. 3 компьютерные программы содержат перечень опций, необходимых для автоматизации деятельности участка ТО и Р лесных машин лесохозяйственных, лесозаготовительных и лесоперерабатывающих производств:

- ведение базы клиентов;
- интеграция с каталогами работ и нормами времени;
- организация работы и планирование загрузки;
- планирование снабжения и закупок;
- организация производственной деятельности;
- формирование необходимых печатных форм документов.

Наиболее известными в РФ программным продуктом такого рода является программы «1С: Предприятие 8. Автосервис» (<https://solutions.1c.ru/catalog/autoservice/buy>) (рис. 4), «Автодилер» (<https://autodealer.ru/solution>) в соответствии с рис. 5 и ряд других, менее функциональных и простых, например:

- stoCRM (узкоспециализированная Online CRM);
- iDirector (онлайн CRM для автосервисов);
- Splus (онлайн программа для автосервиса);
- АвтоПредприятие.

Кроме того, разрабатывается и другое программное обеспечение, о чем свидетельствуют работы С.В. Репина¹⁶ (2007), Е.В. Пухова и Я.В. Комарова (2016) [23].

¹⁶ Репин С.В. Разработка информационной автоматизированной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом строительных машин / С. В. Репин, С. А. Скакун // Строительные и дорожные машины. 2007. №11. С.20-25.

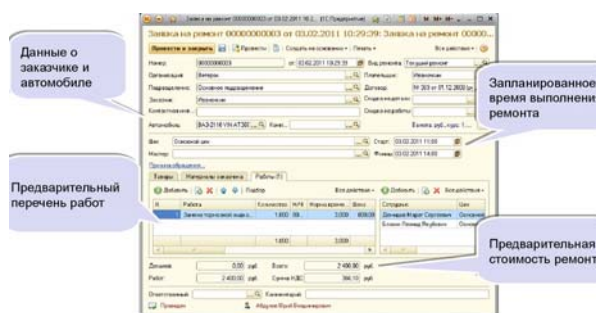


Рисунок 4. Составление заказ-наряда в программе 1С: Предприятие 8. Автосервис

Figure 4. Drawing up an order order in the 1C: Enterprise 8 program. Auto repair

Источник: Собственная схема авторов
Source: Authors' ownscheme

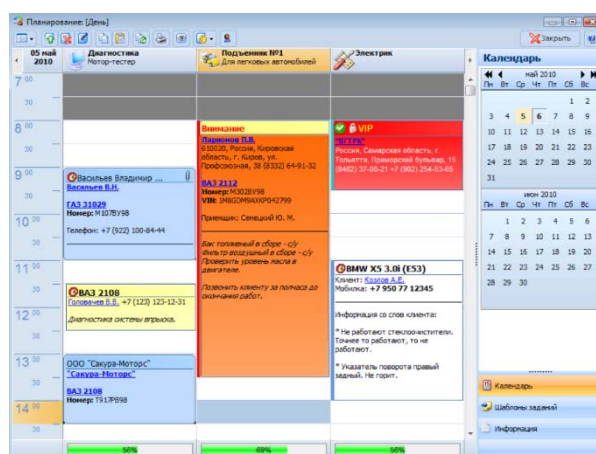


Рисунок 5. Планирование работ в программе Автодилер

Figure 5. Work planning in the Car Dealer program

Источник: Собственная схема авторов
Source: Authors' ownscheme

Вышеперечисленные программы являются общими для всех предприятий, эксплуатирующих транспортно-технологические машины, однако на лесозаготовительных, лесохозяйственных предприятиях данный класс программного обеспечения практически не используется в силу их специфики, направленной на организацию ремонтных работ, оказываемых сторонним потребителям.

Существует и более функциональное программное обеспечение, направленное на автоматизацию

защиту системы технического обслуживания и ремонта (рис. 6).

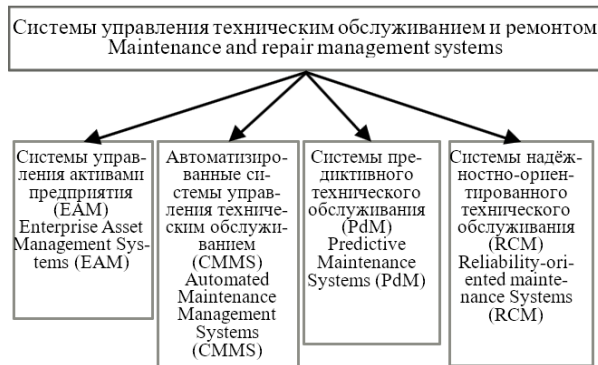


Рисунок 6. Классификация систем управления техническим обслуживанием и ремонтом по способу управления

Figure 6. Classification of maintenance and repair management systems

Источник: Собственная схема авторов
Source: Authors' own scheme

Информационные EAM-системы ТО и Р реализуют возможности управления жизненным циклом лесных машин, их отремонтированных узлов и агрегатов и обслуживаемых компонентов.

Информационные CMMS-системы ТО и Р лесных машин помогают планировать и контролировать затраты на выполнение и распределение работ по ТО и Р с конечной целью продления срока службы актива при минимальных затратах.

Информационные PdM-системы ТО и Р предназначены для предиктивного управления процессом технического обслуживания лесных машин на основе полученных данных о текущем

техническом состоянии и уровне наступления следующего обслуживания с помощью детектирования и машинного зрения.

Информационные RCM-системы [36;65] предназначены для робастного управления ТО и Р по ключевым параметрам вероятности отказов и готовности узлов и агрегатов лесных машин, основанных на теории надежности. RCM-системы работают в направлении сокращения рисков ТО и Р лесных машин, а также оптимального распределения работ [24-26].

Наиболее популярное применяемое в этой области программное обеспечение представлено в табл. 1.

Системы управления ТО и Р могут быть развернуты как на базе сервера или облака [62], так и на мобильных устройствах (рис. 7), что ускоряет и упрощает процесс ввода информации в систему.

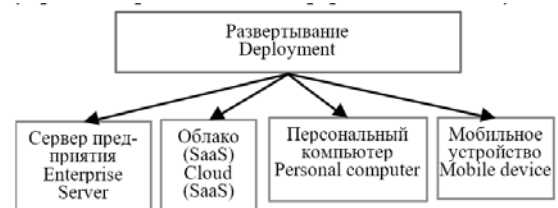


Рисунок 7. Информационные системы управления ТО и Р лесных машин в зависимости от локализации

Figure 7. Information management M&R-systems for forest machines depending on localization

Источник: Собственная схема авторов
Source: Authors' own scheme

Таблица 1

Классификация информационных систем ТО и Р лесных машин по категориям программного обеспечения

Table 1

Classification of M&R information systems of forest machines by software categories

Наименование программного обеспечения | Software title	Системы управления активами предприятия (EAM) Enterprise Asset Management Systems (EAM)	Автоматизированные системы управления техническим обслуживанием (CMMS) Automated Maintenance Management Systems (CMMS)	Системы предиктивного технического обслуживания (PdM) Predictive Maintenance Systems (PdM)	Системы надёжно-ориентированного технического обслуживания (RCM) Reliability-oriented maintenance Systems (RCM)	Группа Group
IC:ТОИР	+	+	+	+	1
NERPA EAM	+	+	+		2
Infor EAM	+	+	+		
F5 EAM	+	+	+		
Ellipse EAM	+	+	+		
TRIM	+	+		+	

Технологии. Машины и оборудование

Наименование программного обеспечения | Software title	Системы управления активами предприятия (EAM) Enterprise Asset Management Systems (EAM)	Автоматизированные системы управления техническим обслуживанием (CMMS) Automated Maintenance Management Systems (CMMS)	Системы предиктивного технического обслуживания (PdM) Predictive Maintenance Systems (PdM)	Системы надёжно-ориентированного технического обслуживания (RCM) Reliability-oriented maintenance Systems (RCM)	Группа Group
Галактика EAM	+	+		+	
HubEx	+	+			3
openMAINT	+	+			
Seascope	+	+			
Global-EAM	+	+			
F5 PMM		+	+		
1С:RCM Управление надёжностью			+	+	
IBM Maximo	+		+		
SAP Predictive Maintenance and Service	+				4
CalemEAM	+				
EcoStruxure	+				
SAP Asset Intelligence Network	+				
Rubius DrEAM	+				
Oracle Enterprise Asset Management	+				
IFS Enterprise Asset Management	+				
Planny24		+			
робоТОиР		+			
AMOS Maintenance and Procurement		+			
UpKeep		+			
КСУТО		+			
ТУРБО ТОРО		+			
RealMaint TORO		+			
TOPS Consulting: ТОиР		+			

Источник: Сравнение системы управления техническим обслуживанием и ремонтом (СУ ТО и Р). – URL: <https://soware.ru/categories/maintenance-management-systems> (Дата обращения: 05.01.2023).

Source: URL: <https://soware.ru/categories/maintenance-management-systems>

Наибольшими возможностями обладает программное обеспечение, входящее как минимум в две категории – (HubEx, openMAINT, IBM Maximo, Seascope, SAP Predictive Maintenance and Service, F5 PMM) – группа 3. Попадание программного обеспечения в три категории расширяет их функциональные возможности (NERPA EAM, TRIM, Infor EAM, F5 EAM) – группа 2. Лидером же является 1С:ТОиР – группа 1, позволяющая как учитывать производственные активы, так и осуществлять контроль технического состояния оборудования в реальном времени (IoT), а также интегрировать все данные с ERP¹⁷¹⁸ системой 1С.

¹⁷ 1С:ТОиР [Электронный ресурс] // URL: <https://1coir.ru/> (Дата обращения: 05.01.2023).

¹⁸ NERPA EAM - система управления основными фондами и активами предприятия. URL: <https://www.novosoft.ru/nerpa/eam> (Дата обращения: 05.01.2023).

Размер предприятия оказывает определяющее влияние, как на функционал программного обеспечения, так и на системные требования к оборудованию, стоимости лицензии. Рассмотренное программное обеспечение охватывает разные виды предприятий (рис. 8) и может использоваться как самостоятельно индивидуальным предпринимателем [22], так и в рамках единой информационной системы предприятия. С точки зрения интеграции с системами управления, необходимо выделить возможность применения ПО как на базе отечественных систем – 1С (1С:ТОиР, 1С:RCM Управление надёжностью), Галактика (Галактика EAM), так и на базе иностранного ПО – IBM (IBM Maximo), SAP (SAP Predictive Maintenance and Service, SAP Asset Intelligence Network), Oracle (Oracle Enterprise Asset Management).

Функциональные возможности программного обеспечения групп 1, 2 и 3, как наиболее эффективных, представлены в таблице 2, а визуализация данных иерархического анализа на рис. 9, а и б. Перечень и классификационные признаки данных программ, специализирующихся на цифровизации системы технического обслуживания и ремонта, представлены в табл. 3, а визуализация данных иерархического анализа на рис. 10, а и б.

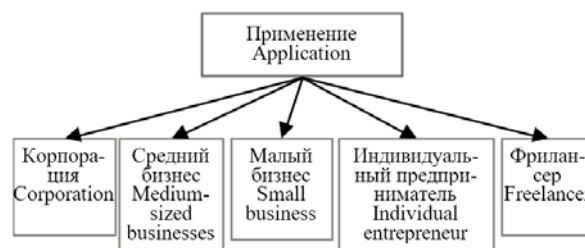


Рисунок 8. Классификация систем управления техническим обслуживанием и ремонтом по размеру предприятия

Figure 8. Classification of maintenance and repair management systems by enterprise size

Источник: Собственная схема авторов
Source: Authors' own scheme

Таблица 2

Сравнение функциональных возможностей программного обеспечения для управления техническим обслуживанием и ремонтом

Table 2

Comparison of the functionality of maintenance and repair management software

Название программы	Функции программы*															
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI
1С:ТОиР	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
NERPA EAM	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Infor EAM	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
F5 EAM	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Ellipse EAM	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
TRIM	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Галактика EAM	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
HubEx	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
openMAINT	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Seascape	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Global-EAM	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
F5 PMM	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
1С:RCM Управление надежностью	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
IBM Maximo	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
SAP Predictive Maintenance and Service	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0

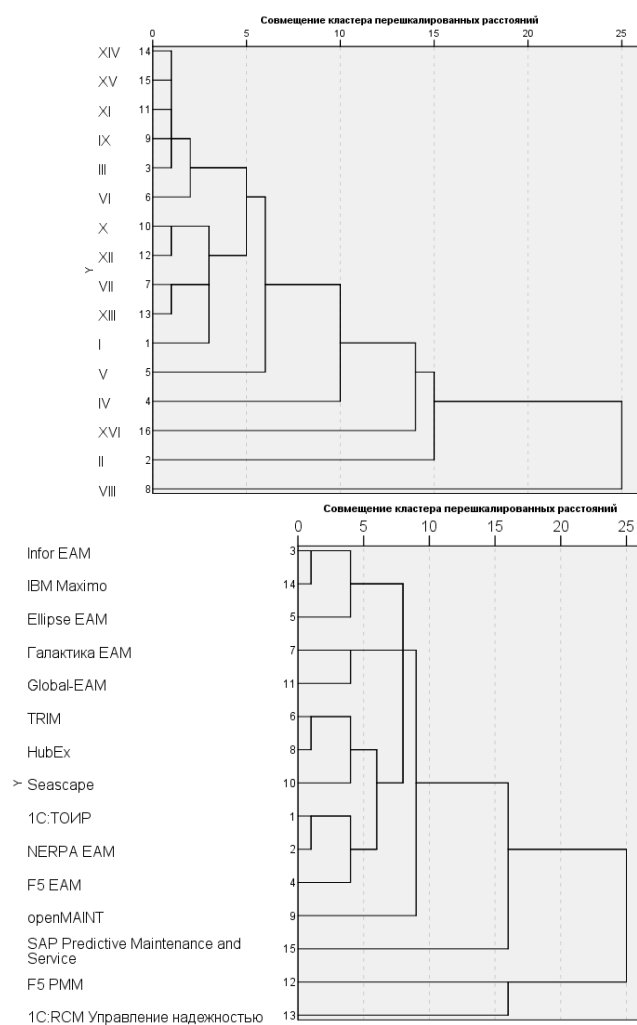
*1 – Планирование ТОиР; 2 – Предиктивное обслуживание; 3 – Администрирование; 4 – Контроль освидетельствований; 5 – Хранение технической документации; 6 – Ведение данных оборудования; 7 – Хранение истории работ ТО и Р; 8 – Функциональная 3D-модель оборудования; 9 – Многопользовательский доступ; 10 – Планово-предупредительное обслуживание; 11 – Модель структуры оборудования; 12 – Управление запасами и

хранением ЗИП; 13 – Управление работами; 14 – Отчётность и аналитика; 15 – Многопользовательский доступ; 16 – Включено в реестр российского ПО

*1– MRO planning; 2 – Predictive maintenance; 3 – Administration; 4 – Inspection control; 5 – Storage of technical documentation; 6 – Maintenance of equipment data; 7 – Storage of the history of maintenance and repair work; 8 - Functional 3D model of equipment; 9 – Multi-user access; 10 – Scheduled preventive maintenance; 11 – Equipment structure model; 12 – Spare parts inventory and storage management; 13 – Work management; 14 – Reporting and analytics; 15 – Multi-user access; 16 - Included in the register of Russian software

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data



a | a б | b

Рисунок 9. Диаграмма сходства и различия для оценки применимости систем управления техническим обслуживанием и ремонтом лесных машин по критериям функциональных возможностей I-XVI (а) и типу программного обеспечения (б)

Figure 9. Diagram of similarities and differences for assessing the applicability of forest machinery maintenance and repair management systems according to the criteria of functionality I-XVI (a) and type of software (b)

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Таблица 3

Сравнительные данные программного обеспечения для управления техническим обслуживанием и ремонтом

Table 3

Comparative data of maintenance and repair management software

Название программы | Name of the program	Предназначение | Destiny				Графический интерфейс | Graphical interface					Развертывание | Deployment				Поддержка промышленного интернета вещей (IIoT) | Industrial Internet of Things (IIoT) support	Интеграция с корпоративными системами | Integration with corporate systems
	I	II	III	IV	V	VI	VI I	VII I	IX	X	XI	XII	XII I	XIV	XV
1С:ТОИР	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1С
NERPA EAM	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
Infor EAM	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
F5 EAM	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1
Ellipse EAM	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1
TRIM	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1
Галактика EAM	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1
HubEx	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1
openMAINT	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
Seascape	1	1	1	0	0	1	1		1	1	1	1	0	1	1
Global-EAM	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1
F5 PMM	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1
1С:RCM Управление надежностью	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1С
IBM Maximo	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
SAP Predictive Maintenance and Service	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1, SAP

*1 – корпорация; 2 – средний бизнес; 3 – малый бизнес; 4 – Индивидуальный предприниматель; 5 – macOS; 6 – Windows; 7 – Linux; 8 – Веб-браузер; 9 – Android; 10 – Сервер предприятия; 11 – Персональный компьютер; 12 – Мобильное устройство; 13 – Облако (SaaS)

*1 – corporation; 2 – medium business; 3 – small business; 4 – Individual entrepreneur; 5 – macOS; 6 – Windows; 7 – Linux; 8 – Web browser; 9 – Android; 10 – Enterprise Server; 11 – Personal computer; 12 – Mobile device; 13 – Cloud (SaaS)

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

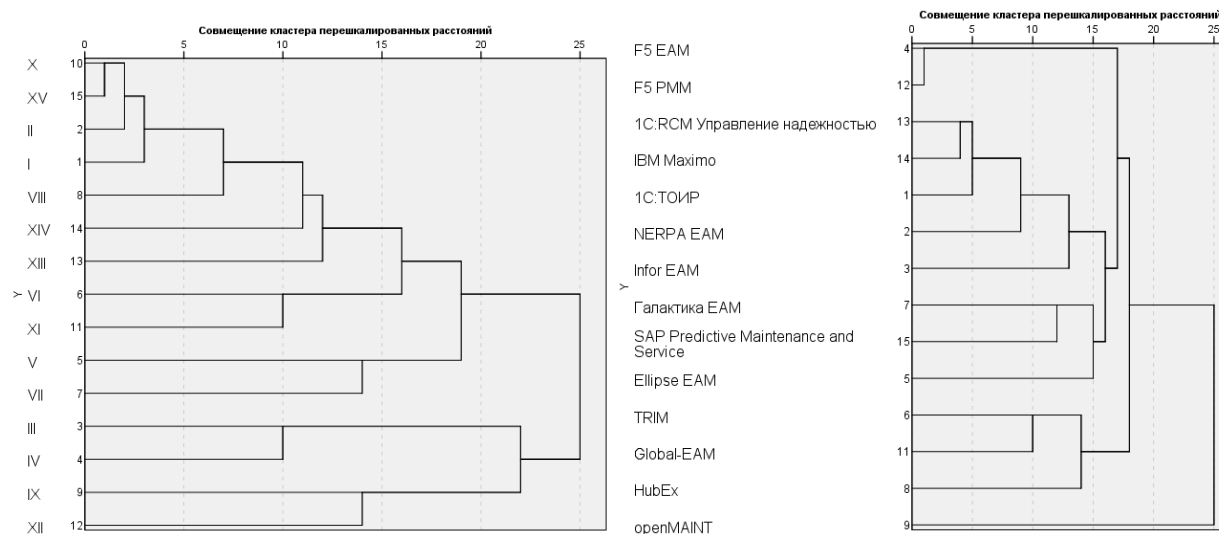


Рисунок 10. Диаграмма сходства и различия для оценки применимости систем управления техническим обслуживанием и ремонт лесных машин по критериям назначения, интерфейса, развертывания, поддержки интернета вещей и интеграции с корпоративными системами I-XV (а) и типу программного обеспечения (б)

Figure 10. Diagram of similarities and differences for assessing the applicability of forest machinery maintenance and repair management systems according to the criteria of purpose, interface, deployment, Internet support, and integration with corporate systems I-XV (a) and type of software (b)

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Назревшая необходимость перехода технического обслуживания и ремонта машин на новый технологический уклад подтверждается примерами внедрения, например, в сельское хозяйство [27-30] как наиболее насыщенное машинами производство, разработкой «алгоритмов и моделей функционирования информационных систем для малых сельскохозяйственных предприятий» [56]. Целесообразно применение такого подхода и для транспортных и дорожно-строительных компаний, лесозаготовительных предприятий [33-35] и многих других, т.к. задача снижения расходов на поддержание исправного состояния транспортно-технологических машин и оборудования актуальна для всех предприятий.

Заключение

Вопросам цифровизации технического обслуживания и ремонта лесных машин в последнее время уделяют большое внимание. В связи с этим разработанное программное обеспечение применяется как для решения отдельных задач, связанных с

упрощением работы ремонтных организаций, так и для управления активами и автоматизации организации процесса управления техническим обслуживанием и ремонтом предприятий, которые эксплуатируют транспортно-технологические машины. Рассмотренное программное обеспечение представлено, как отечественными, так и зарубежными компаниями, разработано для разных операционных систем и обеспечивает функционирование на различном оборудовании.

Лесозаготовительные и лесохозяйственные предприятия имеют специфику эксплуатации и, следовательно, организации технического обслуживания и ремонта лесных машин. Они часто находятся на значительном удалении от основной сервисной базы, что требует особого учета и контроля технического состояния и сервисного обслуживания. Его выполнение осуществляется оператором, выездной бригадой предприятия или официального дилера. Для автоматического мониторинга их технического состояния необходимо, чтобы транспортно-технологические машины были оборудова-

ны диагностической системой и средствами передачи данных.

Выбор конкретного программного продукта должен осуществляться исходя из размеров предприятия, его потребностей, финансовых возможно-

стей. Одно из главных условий – программное обеспечение должно иметь возможность встраивания в единое информационное пространство, позволяющее применить технологию цифровых двойников.

Список литературы

1. Фанта Е.А. Ключевые показатели эффективности в использовании запасных частей как точки контроля в системе управления производственным предприятием // Вопросы инновационной экономики. 2019. Т. 9. № 1. С. 267-274. doi: 10.18334/vinec.9.1.39935. – <https://www.elibrary.ru/bvgqyu>.

2. Безуглов А.Е., Кислицына О.А. Ключевые показатели эффективности при проведении технического обслуживания и ремонта оборудования // Вопросы инновационной экономики. 2019. Т. 9. № 4. С.1501-1514. doi: 10.18334/vinec.9.4.41208. – <https://www.elibrary.ru/sblmtr>.

3. Методы организации системы технического обслуживания и ремонта оборудования с целью обеспечения его безотказной работы / А. Б. Гончаров, А. Б. Тулинов, Б. А. Перепечай, А. А. Гончаров // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2017. № 2. – С. 35-40. – <https://www.elibrary.ru/xwufft>.

4. Дорохин С.В. Критический анализ методов определения рациональных режимов технического обслуживания и ремонта / С. В. Дорохин, И. Н. Кравченко, П. Г. Ларин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2015. № 6. С.44-48. – <https://www.elibrary.ru/txnspb>.

5. Мерданов Ш. М. Совершенствование организации технического обслуживания и ремонта строительно-дорожных машин / Ш. М. Мерданов, В. В. Конев // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. 2020. № 2. С.15-21. – <https://www.elibrary.ru/sdcdrf>.

6. Семькина А С. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта карьерного автомобильного транспорта / А. С. Семькина, Н. А. Загородний // Мир транспорта и технологических машин. 2022. № 3-4(78). С.35-41. DOI 10.33979/2073-7432-2022-4(78)-3-35-41. – <https://www.elibrary.ru/zcciwtr>.

7. 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. – <https://www.elibrary.ru/fyllbw>.

8. Апрышкин Д. С. Совершенствование программы технического обслуживания пассажирских лифтов на основе имитационного моделирования режимов их работы / Д. С. Апрышкин, Г. Ш. Хазанович, В. О. Гутаревич // Advanced Engineering Research. 2021. Т.21, № 2. С.171–183. – <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-171-183>. – <https://www.elibrary.ru/fjczka>.

9. Управление техническим обслуживанием и ремонтом на автотранспортном предприятии с использованием имитационного моделирования / И. В. Макарова, П. А. Буйвол, Л. М. Габсалихова, Э. М. Мухаметдинов // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2020. Т.19. №1. С.10-15. – <https://elibrary.ru/vcneax>.

10. Gölzer P., Fritzsche A. (2017) Data-driven operations management: organisational implications of the digital transformation in industrial practice. Production Planning and Control 28(16):1332-1343. DOI: 10.1080/09537287.2017.1375148

11. Толстых, Т. О. Стратегическое развитие научно-технического потенциала промышленности в условиях цифровой трансформации экономики / Т. О. Толстых, С. Е. Афонин // Экономика промышленности. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 410-417. – DOI: <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2021-4-410-417>. – <https://elibrary.ru/txtgve>.

12. Meissner, H. Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0 / H. Meissner, R. Ilsen, J. C. Aurich // *Procedia CIRP*. – 2017. – Vol. 62. – P. 165-169. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.113>.
13. Kolberg D., Zühlke D. (2015). Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies // *IFAC-PapersOn Line* 48(3):1870-1875. DOI: <https://doi.org/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: <https://doi.org/10.3926/jiem.2915>.
15. Research on early forest fire detection based on the internet of things and spectrum analysis / S. Zhang, Y. Li, D. Gao, Z. Guan // *Journal of Forestry Engineering*. – 2021. – Vol. 6, No. 3. – P. 149-153. – DOI: <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202006045>. – URL: <https://elibrary.ru/sbczge>.
16. Forestry Digital Twin With Machine Learning in Landsat 7 Data / X. Jiang, M. Jiang, Y. Gou et al. // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – P. 1-8. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.916900>.
17. 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 <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/8>. – <https://elibrary.ru/kjqalr>.
18. Деревягин, Р. Ю. Информатизация диагностирования автомобиля // *Актуальные вопросы техники, науки, технологии*. – Брянск, 2021. – С. 176-179. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/ghazvj>.
19. Драпалюк, М. В. Результаты исследований процесса резания ветвей ротором с шарнирно-сочлененными и жестко установленными лезвиями / М. В. Драпалюк, Л. Д. Бухтояров, А. В. Прокудина // *Лесотехнический журнал*. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 80-88. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/7. – <https://elibrary.ru/jlzkej>.
20. Драпалюк, М. В. Результаты имитационного моделирования рабочего процесса ротора-метателя лесопожарной грунтометательной машины / М. В. Драпалюк, А. Ф. Петков, А. К. Поздняков // *Лесотехнический журнал*. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 89-99. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/8. <https://elibrary.ru/lsmxh>.
21. Исследование влияния параметров шнекового барабана лесопожарного грунтометалосопрокладывателя на качество очистки потока грунта от напочвенного покрова / П. И. Попиков, А. К. Поздняков, М. А. Гнусов, А. Ф. Петков // *Лесотехнический журнал*. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 126-134. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/11. <https://elibrary.ru/grnjqg>.
22. Формы поддержки развития предпринимательства в лесном секторе ЦЧР / С. С. Морковина, Ю. Г. Денисова, О. И. Драпалюк, Б. Шанянь // *Лесотехнический журнал*. 2013. № 4(12). С. 210-216. <https://elibrary.ru/rtvozn>.
23. Пухов, Е. В. Разработка информационной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом транспортных и технологических машин / Е. В. Пухов, Я. В. Комаров // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина"*. 2016. № 5(75). С. 35-39. – <https://elibrary.ru/wmulch>.
24. Алгоритм решения задачи оптимального распределения работ в сетевых канонических структурах / А. И. Новиков [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2014. – Т. 4, № 4(16). – С. 309-317. – DOI 10.12737/8515. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/tondhd>.
25. Математическая модель распределения трудовых ресурсов при технической эксплуатации и ремонте автотранспортных средств / С. В. Дорохин [и др.] // *Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса*. – Орел, 2016. – С. 133-139. <https://elibrary.ru/vxxdjz>.

26. Беляева, Т. П. Оптимальное планирование комплексных проектов создания электронной компонентной базы / Т. П. Беляева, А. П. Затворницкий // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 3(65). – С. 5-10. <https://elibrary.ru/ntnxin>.
27. Помогаев, В. М. Информационное обеспечение в системе технического обслуживания и ремонта мобильных машин в сельском хозяйстве / В. М. Помогаев, Г. В. Редеев // Вестник Омского ГАУ. 2022. № 2 (46). С. 145–152. DOI 10.48136/2222-0364_2022_2_145. – <https://elibrary.ru/iprtch>.
28. Роль цифровизации технического сервиса в повышении эффективности сельскохозяйственного производства / Г. А. Иовлев, М. К. Саакян, И. И. Голдина, А. Г. Несговорцов // Аграрное образование и наука. 2019. № 2. С.8. – <https://elibrary.ru/udsodr>.
29. Дунаев, А. В. Совершенствование методов технического обслуживания сельскохозяйственной техники / А. В. Дунаев, В. А. Казакова, В. А. Шинкевич // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 4. С.27-31. – <https://elibrary.ru/xnrbut>.
30. Лебедев, А. Т. Повышение эффективности функционирования машин и оборудования АПК управлением надежностью их систем / А. Т. Лебедев, А. А. Серегин, А. Г. Арженовский // Вестник аграрной науки Дона. 2019. № 2(46). С.4-11. – <https://elibrary.ru/zymfz>.
31. Анализ силового взаимодействия дискового ножа с древесиной при бесстружечном делении / В. П. Ивановский, Д. К. Томенко, С. П. Трофимов, А. В. Киселева // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 4(48). – С. 130-140. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.4/9. – <https://elibrary.ru/exxvqe>.
32. Моделирование процессов ТО и Р парка лесозаготовительных машин с учетом производственной эксплуатации / В. В. Побединский, С. В. Ляхов, М. Н. Салихова, Г. А. Иовлев // Деревообрабатывающая промышленность. 2020. № 4. С. 3-11. – <https://elibrary.ru/yplpky>.
33. Разиных, Е. М. Технологический процесс получения лущеного шпона: влияние внешних температурных условий на оттаивание и прогрев древесины / Е. М. Разиных, Т. Л. Ищенко, С. П. Трофимов // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 4(48). – С. 141-152. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.4/10. <https://elibrary.ru/cquboj>.
34. Тесовский, А. Ю. Пути повышения качества технического обслуживания и ремонта оборудования и машин лесозаготовок и лесного хозяйства на местах эксплуатации // Строительные и дорожные машины. 2017. № 5. С. 40-41. – <https://elibrary.ru/yocisx>.
35. Запруднов, В. И. Потребность парка лесосечных машин в техническом обслуживании / В. И. Запруднов, С. П. Карпачев, М. А. Быковский // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2017. Т.21. №2. С.76-79. DOI 10.18698/2542-1468-2017-2-76-79. – <https://elibrary.ru/ynbbpz>.
36. Tiwari, M. Development and Implementation of Reliability Centered Maintenance (RCM) System Using Artificial Intelligence. / M. Tiwari, M. Chaudhary // OORJA - International Journal of Management & IT. – IEEE, 2019. – Vol. 17. – P. 29-39. DOI: 10.1109/SASG57022.2022.10199533/
37. Патент № 2785599 С1 Российская Федерация, МПК А01С 11/02. Лесопосадочная машина для посадки сеянцев с открытой и закрытой корневой системой : № 2022115054 : заявл. 03.06.2022 : опубл. 09.12.2022 / М. В. Драпалюк, В. В. Стасюк, В. А. Зеликов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова". Режим доступа: <https://elibrary.ru/flzydw>.
38. Драпалюк, М. В. Новые конструкции универсальных лесопосадочных машин для посадки сеянцев с открытой и закрытой корневой системой / М. В. Драпалюк, В. В. Стасюк, В. А. Зеликов // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 4(44). – С. 112-123. Режим доступа: <https://elibrary.ru/xitfhn>.
39. Патент № 2179079 Российская Федерация, МПК В07В 1/16, В07В 13/04. Устройство для очистки и сортирования лесных семян хвойных пород / Л. Т. Свиридов, А. Д. Голев, А. И. Новиков, А. В. Филатов. Режим доступа: <https://elibrary.ru/hknsmk>.

40. Новиков, А. И. Дисковые сепараторы семян в лесохозяйственном производстве / А. И. Новиков. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2017. – 159 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ztgncj>.

41. Соколов, С. В. Тенденции развития операционной технологии аэросева беспилотными летательными аппаратами в лесовосстановительном производстве / С. В. Соколов, А. И. Новиков // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т. 7, № 4(28). – С. 190-205. – DOI https://doi.org/10.12737/article_5a3d040dc79c79.94513194. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ynmjrv>.

42. Посметьев, В. И. Состояние и пути повышения эффективности почвообрабатывающих агрегатов при лесовосстановлении на вырубках / В. И. Посметьев, В. А. Зеликов. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2015. – 236 с. – ISBN 978-5-7994-0699-8. Режим доступа: <https://elibrary.ru/tvnywf>.

43. Novikov, A. I. Visible wave spectrometric features of Scots pine seeds: the basis for designing a rapid analyzer / A. I. Novikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 226. – P. 012064. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012064>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/zbsegt>.

44. VIS-NIR wave spectrometric features of acorns (*Quercus robur* L.) for machine grading / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, S. V. Sokolov, V. Ivetic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Vol. 392. – P. 012009. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012009>.

45. 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>.

46. 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>.

47. 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>.

48. 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>.

49. К вопросу развития системы энергообразования двигателей внутреннего сгорания / С. В. Дорохин [и др.] // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования. – Воронеж, 2014. – Том 1. – С. 272-274. Режим доступа: <https://elibrary.ru/slkaqt>.

50. Абузов, А. В. К вопросу аэродинамики корпусов транспортно-грузовых дирижаблей, проектируемых для лесного комплекса / А. В. Абузов, И. В. Григорьев, Я. А. Абузов // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 1(45). – С. 68-81. – DOI [10.34220/issn.2222-7962/2022.1/6](https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/6). Режим доступа: <https://elibrary.ru/mfjnba>.

51. Бартенев, И. М. Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин / И. М. Бартенев, Е. В. Поздняков // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3(11). – С. 114-123. – <https://elibrary.ru/rqqreb>.

52. Шиловский, В. Н. Оценка факторов эксплуатационной технологичности машин методом регрессионного анализа / В. Н. Шиловский, И. Г. Скобцов, Д. Г. Конанов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – № 240. – С. 163-174. – DOI [10.21266/2079-4304.2022.240.163-174](https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.240.163-174). – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/ntalgn>.

53. Патент № 2712516 Российская Федерация, МПК A01C 7/04, A01C 7/08, B64D 1/16. Устройство для аэросева семян : № 2019115601 : заявл. 21.05.2019 : опубл. 29.01.2020 / С. С. Морковина [и др.]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/rqfuyd>.

54. Патент № 2714705 Российская Федерация, МПК A01G 23/00. Способ восстановления леса : № 2019115418 : заявл. 20.05.2019 : опубл. 19.02.2020 / А. И. Новиков. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/gzdlvj>.

55. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667363 Российская Федерация. Информационная система для участка по ремонту автотранспорта и механизмов : № 2021666981 : заявл. 28.10.2021 : опубл. 28.10.2021 / С. А. Морозов [и др.]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/nrywgh>.

56. Новикова, Т. В. Разработка алгоритма и модели функционирования информационной системы для малого сельскохозяйственного предприятия / Т. В. Новикова, Т. П. Новикова, А. И. Новиков // Моделирование систем и процессов. – 2020. – Т. 13, № 4. С. 53-58. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-13-4-53-58. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/qdcyvj>.

57. Евдокимова, С. А. Анализ товарного ассортимента запасных частей дилерского предприятия автомобильного сервиса с помощью алгоритма FP-Growth / С. А. Евдокимова, К. В. Фролов, А. И. Новиков // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 4. – С. 24-33. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-4-24-33. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/jcngbh>.

58. 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>.

59. Математическая модель оптимального распределения работ в сетевых канонических структурах / О. В. Авсеева [и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 5(301). – С. 48-52. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/sjqbtb>.

60. Нанoeлектроника: очередной этап развития электронной техники / М. Д. Евтеев [и др.] // Техника и технологии: пути инновационного развития. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2013. – С. 140-142. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/tjbbkj>.

61. Controlling means of development electronic component basis / V. N. Achkasov [et al.]. – Lorman, MS, USA : Science Book Publishing House LLC, 2013. – 130 p. – ISBN 978-1-62174-001-8. – <https://www.elibrary.ru/rewhat>.

62. Облачные технологии – становление и перспективы развития / В. В. Лядов [и др.] // Моделирование систем и процессов. – 2013. – № 1. – С. 37-39. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/rbjpfr>.

63. Затворницкий, А. П. Оптимальное планирование комплексных проектов создания электронной компонентной базы / А. П. Затворницкий // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 3(65). – С. 5-10. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/ntnxin>.

64. Al-Naami, M. The Adoption of Circular Business Models in Germany: an Analysis of the DAX40 Companies / M. Al-Naami, K.H. Hofmann, K.-M. Griese // Circular Economy and Sustainability. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00270-5>.

65. Bae, C. Development of a Web-based RCM system for the driverless Rubber-Tired K-AGT system / C. Bae, H. Kim, Y. Son et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2013. – Vol. 23. – № 4. – P. 1142-1156. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-009-0304-9>.

66. Mahmoud, E.G. The Future of Digital Twins for Autonomous Systems: Analysis and Opportunities / E.G. Mahmoud, A. Darwish, A.E. Hassanien. – 2022. – P. 187-200. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96802-1_10.

67. Pohlkötter, F.J. Unlocking the Potential of Digital Twins / F.J. Pohlkötter, D. Straubinger, A.M. Kuhn et al. – 2023. – P. 190-199. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-27933-1_18.

68. Aboshosha, A. IoT-based data-driven predictive maintenance relying on fuzzy system and artificial neural networks / A. Aboshosha, A. Haggag, N. George, H.A. Hamad // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 12186. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38887-z>.

69. Singh, R.R. Building a Digital Twin Powered Intelligent Predictive Maintenance System for Industrial AC Machines / R.R. Singh, G. Bhatti, D. Kalel et al. // *Machines*. – 2023. – Vol. 11. – № 8. – P. 796. – DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11080796>.

References

1. Fanta E.A. Klyucheve pokazateli effektivnosti v ispol'zovanii zapasnyh chastej kak tochki kontrolya v sisteme upravleniya proizvodstvennym predpriyatiem // *Voprosy innovacionnoj ekonomiki*. 2019. Tom 9. № 1. S. 267-274. doi: 10.18334/vinec.9.1.399351. Diener F., Spacek M. (2021). Digital Transformation in Banking: A Managerial Perspective on Barriers to Change. *Sustainability* 13(4):2032. DOI: 10.3390/su13042032

2. Bezuglov A.E., Kislicyna O.A. Klyucheve 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

3. 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.

4. Dorohin S.V. Kriticheskij analiz metodov opredeleniya racional'nyh rezhimov tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta / S. V. Dorohin, I. N. Kravchenko, P. G. Larin // *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*. 2015. № 6. S.44-48.

5. Merdanov Sh. M. Sovershenstvovanie organizacii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta stroi-tel'no-dorozhnyh mashin / Sh. M. Merdanov, V. V. Konev // *Transport i mashinostroenie Zapadnoj Sibiri*. 2020. № 2. S.15-21.

6. Semykina A S. Sovershenstvovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta kar'ernogo avtomobil'nogo transporta / A. S. Semykina, N. A. Zagorodnij // *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2022. № 3-4(78). S.35-41. DOI 10.33979/2073-7432-2022-4(78)-3-35-41.

7. Gurskij, A. S. Ispol'zovanie transportnoj telematiki i distancionnoj diagnostiki dlya sover-shenstvovaniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta transportnyh sredstv / A. S. Gurskij, V. S. Ivashko // *Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*. 2020. T.65. №3. S.375-383. DOI 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383.

8. Apyrshkin D. S. Sovershenstvovanie programmy tekhnicheskogo obsluzhivaniya passazhirskih liftov na osnove imitacionnogo modelirovaniya rezhimov ih raboty / D. S. Apyrshkin, G. Sh. Hazano-vich, V.O. Gutarevich // *Advanced Engineering Research*. 2021. T.21, № 2. S.171–183. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-171-183>

9. Upravlenie tekhnicheskim obsluzhivaniem i remontom na avtotransportnom predpriyatii s ispol'zovaniem imitacionnogo modelirovaniya / I. V. Makarova, P. A. Bujvol, L. M. Gabsalihova, E. M. Muha-metdinov // *AvtoGazoZapravochnyj kompleks + Al'ternativnoe toplivo*. 2020. T.19. №1. S.10-15.

10. Gölzer P., Fritzsche A. (2017) Data-driven operations management: organisational implications of the digital transformation in industrial practice. *Production Planning and Control* 28(16):1332-1343 DOI: 10.1080/09537287.2017.1375148

11. Tolstykh T.O., Afonin S.E. Strategic development of scientific and technical potential of industry during the digital transformation of economy. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2021;14(4):410-417. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2021-4-410-417>

12. Meissner H., Ilsena 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. Research on early forest fire detection based on the internet of things and spectrum analysis / S. Zhang, Y. Li, D. Gao, Z. Guan // Journal of Forestry Engineering. – 2021. – Vol. 6, No. 3. – P. 149-153. – DOI: <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202006045>. – URL: <https://elibrary.ru/sbczge>.
16. Jiang, X. Forestry Digital Twin With Machine Learning in Landsat 7 Data / X. Jiang, M. Jiang, Y. Gou et al. // Frontiers in Plant Science. – 2022. – Vol. 13. – P. 1-8. – DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.916900>.
17. Programmnoe obespechenie dlya upravleniya lesohozyajstvennym i lesozagotovitel'nym proces-sami: oценка 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.
18. Derevyagin R.Yu. Informatizaciya diagnostirovaniya avtomobilya // Aktual'nye voprosy tekhniki, nauki, tekhnologii: Sbornik nauchnyh trudov nacional'noj konferencii, posvyashchennoj 90-letiyu Bryansko-go gosudarstvennogo inzhenerno-tehnologicheskogo universiteta, Bryansk, 09–13 fevralya 2021 goda. Bryansk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Bryanskij gosudarstvennyj inzhenerno-tehnologicheskij universitet", 2021. S. 176-179.
19. Drapalyuk, M. V. Results of studies of the process of cutting branches with a rotor with articulated and rigidly mounted blades / M. V. Drapalyuk, L. D. Bukhtoyarov, A.V. Prokudina // Forestry Engineering Journal. – 2022. – Vol. 12, No. 2(46). – pp. 80-88. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/7. – <https://elibrary.ru/jlzkej>.
20. Drapalyuk, M. V. Results of simulation modeling of the working process of the rotor-thrower of a forest-fire ground-throwing machine / M. V. Drapalyuk, A. F. Petkov, A. K. Pozdnyakov // Forestry engineering journal. – 2022. - Vol. 12, No. 2(46). – pp. 89-99. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/8. <https://elibrary.ru/lsnmxx>.
21. Investigation of the influence of the parameters of the screw drum of a forest fire grunt-strip-laying machine on the quality of cleaning the soil flow from the ground cover / P. I. Popikov, A. K. Pozdnyakov, M. A. Gnusov, A. F. Petkov // Forestry engineering Journal. – 2022. – Vol. 12, No. 2(46). – pp. 126-134. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/11. <https://elibrary.ru/grnjgg>.
22. Forms of support for the development of entrepreneurship in the forest sector of the Central Asian Republic / S. S. Morkovina, Yu. G. Denisova, O. I. Drapalyuk, B. Shan Yang // Forestry engineering journal. 2013. No. 4(12). pp. 210-216. URL: <https://elibrary.ru/rtvozn>.
23. Puhov E.V. Razrabotka informacionnoj sistemy upravleniya tekhnicheskim obsluzhivaniem i re-montom transportnyh i tekhnologicheskikh mashin / E. V. Puhov, Ya. V. Komarov // Vestnik Federal'nogo gos-udarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskij gos-udarstvennyj agroinzhenernyj universitet imeni V.P. Goryachkina". 2016. № 5(75). S. 35-39.
24. Novikov, A. I. Algorithm for solving the problem of optimal distribution of work in network canonical structures / A. I. Novikov [et al.] // Forestry engineering Journal. – 2014. – Vol. 4, No. 4(16). – pp. 309-317. – DOI 10.12737/8515. –URL: <https://elibrary.ru/tondhd>.
25. Novikov, A. I. Algorithm for solving the problem of optimal distribution of work in network canonical structures / A.I. Novikov [et al.] // Forestry engineering Journal. – 2014. - Vol. 4, no. 4(16). - pp. 309-317. URL: <https://elibrary.ru/vxxdjz>.
26. Belyaeva, T. P. Optimal planning of complex projects for the creation of an electronic component base / T. P. Belyaeva, A. P. Zatvornitsky // Information systems and technologies. – 2013. – № 3(65). – P. 5-10. – <https://elibrary.ru/ntnxin>.

27. Pomogaev V.M., Redreev G.V. Informacionnoe obespechenie v sisteme tekhnicheskogo obsluzhiva-niya i remonta mobil'nyh mashin v sel'skom hozyajstve // Vestnik Omskogo GAU. 2022. № 2 (46). S. 145–152. DOI 10.48136/2222-0364_2022_2_145.
28. Rol' cifrovizacii tekhnicheskogo servisa v povyshenii effektivnosti sel'skohozyajstvennogo proizvodstva / G. A. Iovlev, M. K. Saakyan, I. I. Goldina, A. G. Nesgovorov // Agrarnoe obrazovanie i nauka. 2019. № 2. S.8.
29. Dunaev A. V. Sovershenstvovanie metodov tekhnicheskogo obsluzhivaniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki / A. V. Dunaev, V. A. Kazakova, V. A. Shinkevich // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. 2018. № 4. S.27-31.
30. Lebedev A.T. Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya mashin i oborudovaniya APK upravleniem nadezhnost'yu ih sistem / A. T. Lebedev, A. A. Seregin, A. G. Arzhenovskij // Vestnik agrarnoj nauki Dona. 2019. № 2(46). S.4-11.
31. Analysis of the force interaction of a disk knife with wood in chipless division / V. P. Ivanovsky, D. K. Tomenko, S. P. Trofimov, A.V. Kiseleva // Forestry Engineering Journal. – 2022. – Vol. 12, No. 4(48). – P. 130-140. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.4/9. – <https://elibrary.ru/exxvqe>.
32. Modelirovanie processov to i r parka lesozagotovitel'nyh mashin s uchetom proizvodstvennoj ekspluatscii / V. V. Pobedinskij, S. V. Lyahov, M. N. Salihova, G. A. Iovlev // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'. 2020. № 4. S. 3-11.
33. Razinkov, E. M. Technological process of obtaining peeled veneer: the influence of external temperature conditions on thawing and warming of wood / E. M. Razinkov, T. L. Ishchenko, S. P. Trofimov // Forestry Engineering Journal. - 2022. – Vol. 12, No. 4(48). – P. 141-152. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.4/10. <https://elibrary.ru/cquboj>.
34. Tesovskij, A. Yu. Puti povysheniya kachestva tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya i mashin lesozagotovok i lesnogo hozyajstva na mestah ekspluatscii // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2017. № 5. S. 40-41.
35. Zaprudnov, V. I. Potrebnost' parka lesosechnykh mashin v tekhnicheskome obsluzhivanii / V. I. Zaprudnov, S. P. Karpachev, M. A. Bykovskij // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. 2017. T.21. №2. S.76-79. DOI 10.18698/2542-1468-2017-2-76-79.
36. Tiwari, M. Development and Implementation of Reliability Centered Maintenance (RCM) System Using Artificial Intelligence. / M. Tiwari, M. Chaudhary // OORJA - International Journal of Management & IT. – IEEE, 2019. – Vol. 17. – P. 29-39. DOI: 10.1109/SASG57022.2022.10199533/
37. Patent No. 2785599 C1 Russian Federation. Forest planting machine for planting seedlings with an open and closed root system / M. V. Drapalyuk, V. V. Stasyuk, V. A. Zelikov. Access mode: <https://elibrary.ru/flzydw>.
38. Drapalyuk, M. V. New constructions of universal forest planting machines for planting seedlings with open and closed root system / M. V. Drapalyuk, V. V. Stasyuk, V. A. Zelikov // Forestry Engineering Journal. – 2021. – Vol. 11, No. 4(44). – pp. 112-123. Access mode: <https://elibrary.ru/xitfhn>.
39. Patent No. 2179079 Russian Federation. Device for cleaning and sorting of coniferous forest seeds / L. T. Sviridov, A.D. Golev, A. I. Novikov, A.V. Filatov. Access mode: <https://elibrary.ru/hknsmk>.
40. Novikov, A. I. Disc separators of seeds in forestry production / A. I. Novikov. – Voronezh : Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2017. – 159 p. Access mode: <https://elibrary.ru/ztgncj>.
41. Sokolov, S. V. Trends in the development of operational technology of aerial seeding by unmanned aerial vehicles in reforestation production / S. V. Sokolov, A. I. Novikov // Forestry Engineering Journal. – 2017. – Vol. 7, No. 4(28). – pp. 190-205. – DOI https://doi.org/10.12737/article_5a3d040dc79c79.94513194. URL: <https://elibrary.ru/ynmjrv>.

42. Posmetyev, V. I. The state and ways of increasing the efficiency of tillage aggregates during reforestation in cuttings / V. I. Posmetyev, V. A. Zelikov. – Voronezh, 2015. – 236 p.– ISBN 978-5-7994-0699-8. URL: <https://elibrary.ru/tvnywf>.
43. Novikov, A. I. Visible wave spectrometric features of Scots pine seeds: the basis for designing a rapid analyzer / A. I. Novikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 226. – P. 012064. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012064>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/zbsegt>.
44. VIS-NIR wave spectrometric features of acorns (*Quercus robur* L.) for machine grading / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, S. V. Sokolov, V. Ivetic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Vol. 392. – P. 012009. – DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012009>.
45. 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>.
46. 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>.
47. 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>.
48. 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>.
49. 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. – Volume 1. – pp. 272-274. Access mode: <https://elibrary.ru/slkaqt>.
50. Arbuzov, A.V. On the issue of aerodynamics of the hulls of transport and cargo airships designed for the forest complex / A.V. Arbuzov, I. V. Grigoriev, Ya. A. Arbuzov // Forestry Engineering Journal. – 2022. – Vol. 12, No. 1(45). – pp. 68-81. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.1/6. Режим доступа: <https://elibrary.ru/mfjnba>.
51. Bartenev, I. M. The wearing capacity of soils and its effect on the durability of working bodies of tillage machines / I. M. Bartenev, E. V. Pozdnyakov // Forestry Engineering Journal. – 2013. – № 3(11). – Pp. 114-123. – <https://elibrary.ru/rqqpeb>.
52. Shilovsky, V. N. Evaluation of factors of operational manufacturability of machines by regression analysis method / V. N. Shilovsky, I. G. Skobtsov, D. G. Konanov // Izvestiya St. Petersburg Forestry Academy. – 2022. – № 240. – pp. 163-174. – DOI 10.21266/2079-4304.2022.240.163-174. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/ntalgn>.
53. Patent No. 2712516 Russian Federation. Device for aerial seed sowing / S. S. Morkovina [et al.]. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/rqfuyd>.
54. Patent No. 2714705 Russian Federation. Method of forest restoration / A. I. Novikov. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/gzdlvj>.
55. Certificate of state registration of the computer program No. 2021667363 Russian Federation. Information system for the site for the repair of vehicles and mechanisms : No. 2021666981 : application 28.10.2021 : publ. 28.10.2021 / S. A. Morozov [et al.]. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/nrywgh>.
56. Novikova, T. V. Development of an algorithm and a model of the functioning of an information system for a small agricultural enterprise / T. V. Novikova [et al.] // Modeling of systems and processes. – 2020. – Vol. 13, No. 4. pp. 53-58. – DOI 10.12737/2219-0767-2021-13-4-53-58. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/qdcyvjv>.

57. Evdokimova, S. A. Analysis of the product range of spare parts of an automobile service dealer enterprise using the FP-Growth algorithm / S. A. Evdokimova [et al.] // Modeling of systems and processes. – 2022. – Vol. 15, No. 4. – pp. 24-33. – DOI 10.12737/2219-0767-2022-15-4-24-33. – URL: <https://www.elibrary.ru/jcnghb>.
58. Novikov, A.I. Production of Complex Knowledgebased Systems: Optimal Distribution of Labor Resources Management in the Globalization Context / A. I. Novikov [et al.] // Globalization and its socio-economic consequences : Proceedings, Rajecke Teplice, Slovak Republic. – Rajecke Teplice, Slovak Republic: University of Zilina, 2018. – P. 2275-2281. – URL: <https://www.elibrary.ru/yxkpwh>.
59. Avseeva, O.V. Mathematical model of optimal distribution of work in network canonical structures / O. V. Avseeva [et al.] // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2013. – № 5(301). – Pp. 48-52. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/sjqbtb>.
60. Evteev, M.D. Nanoelectronics: the next stage in the development of electronic technology / M. D. Evteev [et al.] // Technique and technology: ways of innovative development. – Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book", 2013. – pp. 140-142. – URL: <https://www.elibrary.ru/tjbbkj>.
61. Achkasov, V. N. Controlling means of development electronic component basis / V. N. Achkasov [et al.]. – Lorman, MS, USA : Science Book Publishing House LLC, 2013. – 130 p. – ISBN 978-1-62174-001-8. – <https://www.elibrary.ru/rewhat>.
62. Lyadov, V.V. Cloud technologies – formation and prospects of development / V. V. Lyadov [et al.] // Modeling of systems and processes. – 2013. – No. 1. – pp. 37-39. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/rbjpfr>.
63. 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). – Pp. 5-10. – Access mode: <https://www.elibrary.ru/ntnxin>.
64. Al-Naami, M. The Adoption of Circular Business Models in Germany: an Analysis of the DAX40 Companies / M. Al-Naami, K.H. Hofmann, K.-M. GRIESE // Circular Economy and Sustainability. – 2023. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00270-5>.
65. Bae, C. Development of a Web-based RCM system for the driverless Rubber-Tired K-AGT system / C. Bae, H. Kim, Y. Son et al. // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2013. – Vol. 23. – № 4. – P. 1142-1156. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-009-0304-9>.
66. Mahmoud, E.G. The Future of Digital Twins for Autonomous Systems: Analysis and Opportunities / E. G. Mahmoud, A. Darwish, A.E. Hassanien. – 2022. – P. 187-200. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96802-1_10.
67. Pohlkötter, F.J. Unlocking the Potential of Digital Twins / F.J. Pohlkötter, D. Straubinger, A.M. Kuhn et al. – 2023. – P. 190-199. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-27933-1_18.
68. Aboshosha, A. IoT-based data-driven predictive maintenance relying on fuzzy system and artificial neural networks / A. Aboshosha, A. Haggag, N. George, H.A. Hamad // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 12186. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38887-z>.
69. Singh, R.R. Building a Digital Twin Powered Intelligent Predictive Maintenance System for Industrial AC Machines / R.R. Singh, G. Bhatti, D. Kalel et al. // Machines. – 2023. – Vol. 11. – № 8. – P. 796. – DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11080796>.

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, Российская Федерация, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1831-6893>, e-mail: 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, Российская Федерация, 241037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0175-9030>, e-mail: sv@bgitu.ru.

Новикова Татьяна Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

Зеликов Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент кафедры организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

✉ *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.

Чуйков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова 13а, г. Минск, Республика Беларусь, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

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.

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.

Tatyana P. Novikova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Technology and Microelectronic Engineering, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

Vladimir A. Zelikov – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Transportation Organization and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

✉ *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, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8689-955X>, e-mail: stasiuk.volodya@yandex.ru.

Alexey S. Chuikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarussian State Technological University, 13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

✉ Для контактов/Corresponding author

Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7>

УДК 630 : 631.313.02



Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий

Сергей В. Малюков¹✉, malyukovsergey@yandex.ru, 0000-0003-2098-154X

Михаил Н. Лысыч¹, vum1@yandex.ru, 0000-0002-3764-3873

Леонид Д. Бухтояров¹, vglta-mlx@yandex.ru, 0000-0002-7428-0821

Евгений В. Поздняков¹, pozd.ev@yandex.ru, 0000-0003-3904-867x

Максим А. Гнусов¹, mgnusov@yandex.ru, 0000-0003-1653-4595

Михаил В. Шавков², shavkovmv@mail.ru, 0000-0003-3700-7508

Александр Ф. Петков¹, alexanderpetkoff@mail.ru, 0000-0002-6348-8934

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

²ООО «Русгидроком», ул. Мазлумова, д. 25, г. Воронеж, 394040, Российская Федерация

Дисковые рабочие органы лесных почвообрабатывающих орудий эксплуатируются в контакте с почвенной средой, что является предпосылкой для разработки комбинированного почвообрабатывающего орудия. Одними из основных активных рабочих органов приняты дисковые рабочие органы, которые монтируют на различной лесохозяйственной и сельскохозяйственной технике: плуги, сеялки, бороны и т.д. и предназначены для обработки лесных площадей при лесовосстановлении. Дисковые рабочие органы классифицированы по типу, назначению и конструкции. В связи с тем, что лесные почвы наводнены корнями, пнями, камнями, а при проведении лесовосстановительных работ нуждаются в качественной подготовке, то требуется увеличивать количество проходов по обрабатываемой территории. Дисковые рабочие органы с момента своего создания продолжают претерпевать усовершенствования, направленные на повышение эффективности, повышение прочностных характеристик и т.д. Дисковые рабочие органы представляли широкий диапазон конструктивных особенностей, но в последующем диапазон был сконцентрирован на снижение тягового сопротивления. Изменение конструкции в процессе исследования рабочего органа привело к созданию вырезов различных геометрических размеров, одной из положительных характеристик стало снижение тягового усилия, требуемого для резания, крошения почвы, а также повышение качественных характеристик.

Ключевые слова: *почвообрабатывающие орудия, дисковые рабочие органы, лесные вырубки, каменистые почвы, классификация, анализ.*

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий / С. В. Малюков, М. Н. Лысыч, Л. Д. Бухтояров, Е. В. Поздняков, М. А. Гнусов, М. В. Шавков, А. Ф. Петков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 128–141. – Библиогр.: с. 134–140 (41 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7>.


Поступила: 28.06.2023 **Пересмотрена** 12.08.2023 **Принята:** 13.08.2023 **Опубликована онлайн:** 18.09.2023


Review


Analysis of disk working bodies of forest soil-cultivating implements


Sergey V. Malyukov¹✉, malyukovsergey@yandex.ru,  0000-0003-2098-154X

Mikhail N. Lysych¹, vum1@yandex.ru,  0000-0002-3764-3873

Leonid D. Bukhtoyarov¹, vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

Evgeny V. Pozdnyakov¹, pozd.ev@yandex.ru,  0000-0003-3904-867x

Maksim A. Gnusov¹, mgnusov@yandex.ru,  0000-0003-1653-4595

Michael V. Shavkov², shavkovmv@mail.ru,  0000-0003-3700-7508

Alexander F. Petkov¹, alexanderpetkoff@mail.ru,  0000-0002-6348-8934

¹ FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva street, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

² LLC Rushydrocom, Mazlumova street, 25, Voronezh, 394040, Russian Federation

Abstract

The designs of disk working bodies are analyzed and a variant of the developed combined tillage tool is presented. One of the main active working bodies is disc working bodies, which are mounted on various forestry and agricultural machinery: plows, seeders, harrows, etc. and are intended for processing forest areas during reforestation. Disk working bodies are classified, which are divided by type, purpose and design. Due to the fact that forest soils are flooded with roots, stumps, stones, and when carrying out reforestation work they need high-quality preparation, it is required to increase the number of passes through the cultivated territory. Disc working bodies from the moment of their creation continue to undergo improvements aimed at increasing efficiency, increasing strength characteristics, etc. Disc working bodies represented a wide range of design features, but in the subsequent range was concentrated on reducing traction resistance. A change in the design in the process of studying the working body led to the creation of cutouts of various geometric sizes, one of the positive characteristics was a decrease in the traction force required for cutting, crumbling the soil, as well as an increase in quality characteristics.

Keywords: *soil-cultivating tools, disk working bodies, forest clearings, stony soils, classification, analysis.*

Funding: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>

Acknowledgement: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citation: Malyukov S. V., Lysych M. N., Bukhtoyarov L. D., Pozdnyakov E. V., Gnusov M. A., Shavkov M. V., Petkov A. F. (2023) Analysis of disk working bodies of forest soil-cultivating implements. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 128-141 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7>.

Received: 28.06.2023 **Revised:** 12.08.2023 **Accepted:** 13.08.2023 **Published online:** 18.09.2023

Введение

Своевременное возобновление леса на огромных вырубаемых площадях – одна из основ-

ных задач лесного хозяйства. Площади, на которых располагался лесной массив, подвергшийся рубкам, пожарам, затоплениям и т.д., насыщены корнями,

пнями и камнями, а также иными особенностями лесных почв, требуют повышенных требований к разрабатываемой технике [1-4].

Большой объем лесных площадей гибнет в пожарах. Объемы сгоревших насаждений обозначены различными породами древесины [5].

В настоящее время актуальность приобретают комбинированные орудия как в сельском [6-11], так и в лесном хозяйстве, которые выполняют комбинированную обработку почвы – это способ, при котором два или более различных почвообрабатывающих рабочих органов работают, чтобы обрабатывать почву и снизить затрачиваемые временные рамки при выполнении работ [12-15].

Дисковые рабочие органы позволяют производить интенсивную обработку почвы и резание травянистой подстилки, при этом обладают низкой забиваемостью и высоким крошением почвенного пласта, а также за счёт того, что осуществляется процесс «перекатывания» рабочего органа, повышается проходимость, что является одной из главных характеристик лесных почвообрабатывающих орудий [16-22].

Обязательным условием для корректной работы в различных рабочих условиях для дисковых рабочих органов требуется монтаж на раме агрегата при помощи предохранительных механизмов [23-25].

Все же при подборе дисковых орудий, их моделировании и динамометрировании [41] для лесовосстановительных операций при наличии каменистых включений, большого количества пней требуется, чтобы комбинированное почвообрабатывающее орудие было оснащено:

- подходящими дисковыми рабочими органами, подобранными под определенный рельеф местности;
- дисковые рабочие органы должны быть смонтированы на индивидуальные стойки;
- дисковые рабочие органы должны показывать наивысшую эффективность и качество обработки.

Представим классификацию разработанных на сегодняшний день дисков. Основными являются: вырезные, сплошные, составные, со съёмными но-

жами, с вырезами на режущей кромке, плоские, сферические, конические [26-28, 34].

Обработка лесных и сельскохозяйственных [29-31] площадей дисковыми рабочими органами приобретает свою актуальность в период активной продажи дисковых борон в США [32, 33].

Во время взаимодействия дисковых рабочих органов с грунтом начинается процесс трансформации физико-механических свойств грунта [34]. Дисковые рабочие органы, в составе комбинированных почвообрабатывающих орудий, показывают высокую степень обработки грунта, повышенную проходимость по сравнению с другими орудиями, при наименьшей энергоёмкости во время осуществления технологических операций.

Цель настоящих исследований – проанализировать имеющееся дисковые рабочие органы и создать комбинированное почвообрабатывающее орудие, позволяющее выполнять работы на различных лесных площадях.

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Объектом исследования являются дисковые рабочие органы почвообрабатывающих орудий.

Предметом исследования является взаимодействие сферических дисков с почвенной средой.

Сбор данных

Поиск информации производился в поисковой системе «Яндекс», а также в базах данных КиберЛенинка и eLIBRARY. В поисковую строку вводились запросы «дисковые рабочие органы» ИЛИ «почвообрабатывающие орудия» ИЛИ «сферические диски». Временной интервал поиска был выбран с 1960 по 2023 годы.

Научно исследовательские работы, проводимые как индивидуальными исследователями, так и научными коллективами показывают различные направления для применения сферических дисков, но работы по усовершенствованию технологических и качественных параметров продолжают проводиться.

Научно технические работы, выполненные В.А. Ежовым для сплошного сферического диска, состояли в том, чтобы создать сферический диск из

двух слоев: первый слой, находящийся внутри диска «твердый», а второй слой находящийся снаружи диска «мягкий» (Патенты на полезные модели и изобретения Российской Федерации за период с 1994 по 2010 год : МКИ А 01 В 5/00, 7/00, 19/00, 21/00, 21/08, 61/04).

Общим недостатком для сферических дисков считается повышенное лобовое сопротивление, в значительной степени проявляющееся при малых углах атаки диска. В связи с этим, разработаны сферические диски, позволяющие повысить качественные характеристики работы дискового рабочего органа. Так как грунт в них поступает через вырезы (окна), диски обладают сниженным тяговым сопротивлением. У них также уменьшена вероятность залипания поверхности сферического диска грунтом. Число вырезов и их геометрические параметры основаны на прочностных свойствах материала сферического диска и физико-механических особенностей грунта.

Созданный дисковый рабочий орган коллективом ученых Краснодарского научно-исследовательского института сельского хозяйства им. П.П. Лукьяненко, снабжен несколькими конструктивными особенностями в виде вырезов. Рабочая поверхность расположена радиально и приходится на траекторию прямой, идущей из центральной точки рабочего органа. Другая рабочая поверхность проходит под углом φ к радиусу. Напряжение, с которым воздействует рабочий орган на почвенный пласт, зависит от направления поступательного движения агрегата (Авторские свидетельства СССР за период с 1960 по 1991 год : МКИ А 01 В 5/14, 7/00, 13/00, 19/02, 21/00, 21/08, 23/04, 23/06).

Еще одной формой сферического диска может быть «многоугольник». Были проведены научные исследования, позволившие разработать и создать дисковый орган, где рабочая поверхность проходит по окружности диска. Прерывистая поверхность диска создана при помощи вырезов, сделанными в сторону плоскости с рабочей частью диска.

Научной группой ученых Краснодарского научно-исследовательского института сельского

хозяйства им. П.П. Лукьяненко проведены научные исследования, позволившие разработать и создать дисковый орган, по окружности которого созданы вырезы. Каждый вырез разбит на две стороны, первая описывает радиальную линию или радиус от 30 до 90 мм, наивысшая точка находится по радиусу от 20 до 60 мм, при этом вторая часть соотнесена с положением наивысшей точки.

Компания ОАО «АСМ-Запчасть» создала конструкцию сферического секторного диска, с полукруглыми вырезами на рабочей окружности. Заточка рабочей поверхности произведена со стороны рельефной поверхности диска, а полукруглые вырезы выполнены в виде отдельных сегментов и расположены на окружности диска на заклепках (Патенты на полезные модели и изобретения Российской Федерации за период с 1994 по 2010 год : МКИ А 01 В 5/00, 7/00, 19/00, 21/00, 21/08, 61/04).

Научным коллективом Белгородской государственной сельскохозяйственной академии разработан сферический вырезной диск, оснащенный зубьями, у которых передняя и задняя режущие кромки выполнены по логарифмической спирали.

Поступательное движение и качественные характеристики по типу перемешивания почвы зависят от диаметра сферического диска и радиуса кривизны, а также формы выреза и частоты вращения [35-39].

Выполнив анализ различных конструкций дисковых рабочих органов, видно, что полученные результаты по усовершенствованию особенностей дисковых рабочих органов проводятся и обращены в сторону: снижения тягового усилия при резании и оборачивании пласта почвы, и снижения затрат при технологической разделке лесных площадей.

Анализ данных

При проведении анализа дисковых рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов был применен иерархический агломеративный метод (joining (tree clustering)), который позволяет осуществить компьютерный пакет STATISTICA и программа Microsoft Excel. В данной программе были выбраны расстояния между объектами – степенное расстояние (Power distance). Также в качестве меры связи кластеров был выбран метод

Варда (Ward's method). Сравнивались параметры (диаметр дисков, угол атаки дисков, глубина обработки почвы).

Результаты и их обсуждение

На основании проведенного анализа потенциальной способности дисковых рабочих органов выполнять качественную обработку лесных площадей следует отметить, что дисковые рабочие органы, в составе комбинированного почвообрабатывающего орудия, имеют наибольший потенциал для применения в лесном хозяйстве.

Разработанное нами комбинированное почвообрабатывающее орудие (рис. 1) относится к лесному хозяйству, в частности, к орудиям для обработки почвы при лесовосстановлении в условиях нераскорчеванных вырубок и гарей [40].

Существующие лесные почвообрабатывающие орудия не позволяют выполнять эффективную работу на закустаренных, возобновившихся вырубках или сильнозадернелых площадях, когда наличие малоценной поросли или плотного слоя дерна не позволяет обеспечить качественный оборот пласта и заделку большого объема древесно-кустарниковой и травянистой растительности.

Отличительной особенностью является то, что комбинированное почвообрабатывающее орудие имеет весьма гибкую структуру, позволяющую при необходимости демонтировать или дооснастить рабочими узлами раму агрегата.

Дисковая батарея состоит из четырех дисков, три из которых диаметром 490 мм имеют 4 выреза в полости диска, а четвертый диаметром 510 мм выполнен цельнокрайним. Данные особенности формы дисков позволяют часть объема почвы пропускать

через диск, что улучшает качество измельчения почвенных пластов, подрезаемых дисками батареи.

Комбинированное почвообрабатывающее орудие агрегируется с тракторами на задней навеске. Технологический процесс комбинированной обработки начинается с того, что МТА заезжает на лесной участок, который предназначен для проведения лесовосстановительных работ. Так как агрегат состоит из серии идущих подряд рабочих органов, то в работу вступает ножевой каток 6, который производит укатывание и измельчение древесно-кустарниковых растений перед началом работы дисковых корпусов 9. Далее дисковые батареи 8, установленные под углом 0-30°, за счет действия реактивных сил соприкосновения с почвой, осуществляют вращательное движение и производят ее обработку в виде двух полос на глубину 6-12 см.

Расположенные в задней части орудия дисковые корпуса 9 диаметром 660 мм, перемещаясь в рабочей зоне ножевого катка 6 и дискового ножа 7, создают двухотвальную борозду глубиной 8-15 см путем подрезания почвенных пластов с измельченной древесно-кустарниковой порослью, их оборота и укладки на обработанные дисковыми батареями 8 полосы по краям борозды.

Такое исполнение комбинированного почвообрабатывающего орудия позволяет повысить качество обработки лесных почв на нераскорчеванных вырубках и гарях за счет более эффективной заделки нежелательной древесно-кустарниковой и травянистой растительности.

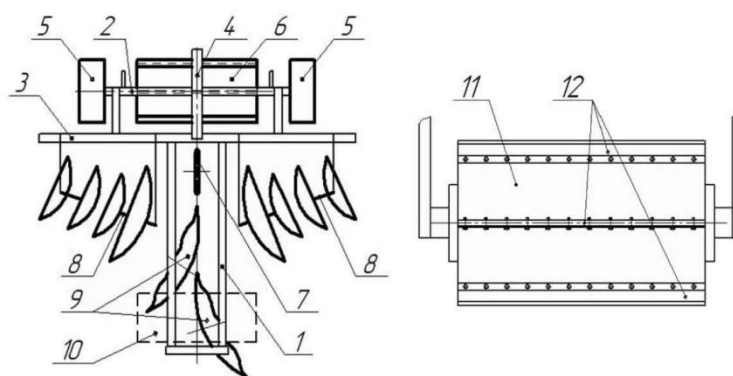


Рисунок 1. Комбинированное почвообрабатывающее орудие

- 1) рама; 2) поперечная балка; 3) основная поперечная балка; 4) механизм навески; 5) опорные колеса; 6) ножевой каток; 7) дисковый нож; 8) две дисковые батареи; 9) два дисковых корпуса; 10) балластный ящик; 11) цилиндрическое основание ножевого катка; 12) съемные ножевые пластины

Figure 1. Combined tillage implement

- 1) frame; 2) cross beam; 3) main cross beam; 4) linkage mechanism; 5) support wheels; 6) knife roller; 7) circular knife; 8) two disk batteries; 9) two disk cases; 10) ballast box; 11) cylindrical base of the knife roller; 12) Removable knife plates

Источник: Патент на полезную модель №217468, 2023. [40]

Source: Utility model patent №217468, 2023. [40]

Результаты сравнительного анализа дисковых рабочих органов приведены в табл. 1, а также на рис. 2.

Таблица 1

Сравнительный анализ параметров сферических дисков

Table 1

Comparative analysis of the parameters of spherical disks

Агрегат Unit	Диаметр дисков, мм | Disc diameter, mm	Угол атаки дисков, ° | Disc attack angle, °	Глубина обра- ботки почвы, см | Depth of till- age, cm
БПМ-5 | BPM-5	1000	18	22
БДН-2,5М | BDN-2,5M	1000	25	22
ПНД-2 | PND-2	665	39	28
АГН-1,8 | AGN-1,8	680	20	14
БДУ-1,5н | BDU-1,5n	560	30	12
D-620	620	20	18
КЛБ-1,7 | CLB-1,7	510	20	10
У363	560	16	12
ПД-3,3 | PD-3,3	640	20	20
РДП-4x4 | RDP-4x4	560	30	15
ПЛД-3x4 | PLD-3x4	560	20	12

Источник: АгроБаза Режим доступа:
https://www.agrobase.ru/catalog/machinery/machinery_c0b871da-4422-4842-88b4-9de003236593

Source: AgroBaza. URL:
https://www.agrobase.ru/catalog/machinery/machinery_c0b871da-4422-4842-88b4-9de003236593

Провели анализ дендрограммы (рис. 2), из которого следует, что приведенные агрегаты можно разделить на пять групп. В первую группу вошли два агрегата (БПМ-5 и БДН-2,5М), которые имеют большие диаметры дисков, среднюю глубину обработки почвы и средние значения угла атаки дисков. Во второй группе представлен один агрегат (ПНД-2), имеющий средние размеры дисков и большие значения угла атаки дисков и глубины обработки почвы. В третий – три агрегата (АГН-1,8, D-620, ПД-3,3). Они имеют два средних параметра (диаметр дисков и угол атаки дисков) и один параметр, имеющий незначительное отличие (глубина обработки почвы). В четвертый кластер также вошли три агрегата (КЛБ-1,7, ПЛД-3x4, У363). Они представлены двумя низкими параметрами (диаметр дисков и глубина обработки почвы) и один параметр, имеет незначительное отличие (угол атаки дисков). В пятом кластере собраны

два агрегата (БДУ-1.5н и РДП-4х4). Они имеют два низких параметра (диаметр дисков и глубина обработки почвы) и один высокий параметр (угол атаки дисков).

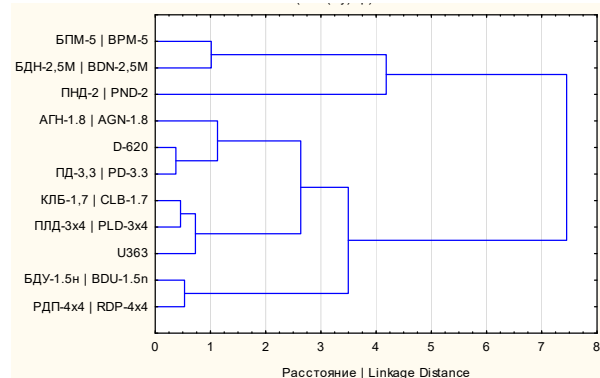


Рисунок 2. Дендограмма сходства и различия дисковых рабочих органов

Figure 2. Dendrogram of similarities and differences of disk working bodies

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Выводы

Проанализировав конструктивные и технологические параметры дисковых рабочих органов, было разработано комбинированное почвообра-

батывающее орудие, позволяющее проводить основную (на глубину 8-15 см) и дополнительную обработку почвы, а также агротехнические уходы (на глубину 6-12 см) в условиях лесных вырубок и гарей.

Произведен подбор наиболее подходящих дисковых рабочих органов. Дисковая батарея должна состоять из четырех дисков, три из которых диаметром 490 мм должны иметь 4 выреза в полости диска, а четвертый диаметром 510 мм должен быть выполнен цельнокрайним, при этом угол атаки должен изменяться в пределах 0-30°. Дисковые корпуса для создания борозд должны иметь диаметр 660 мм. При необходимости ряд рабочих органов комбинированного почвообрабатывающего орудия может быть демонтирован непосредственно перед началом работы по проведению агротехнического или лесоводственного ухода за созданными лесными культурами.

Такое исполнение комбинированного почвообрабатывающего орудия позволяет повысить качество обработки лесных почв на нераскорчеванных вырубках и гарях за счет более эффективной заделки нежелательной древесно-кустарниковой и травянистой растительности.

Список литературы

1. Посметьев В.И., Зеликов В.А., Латышева М.А., Посметьев В.В. Основные причины недостаточной эффективности лесных почвообрабатывающих агрегатов и пути ее повышения. Воронежский научно-технический Вестник. 2015;3-3 (13):45-59. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24353760>.
2. Малюков С.В., Аксенов А.А., Князев А.В., Бородин Н.А., Солнцев А.В. Обзор конструкций почвообрабатывающих машин, применяемых для междурядной обработки лесных культур. Воронежский научно-технический Вестник. 2019;1(27):107-118. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37604715>.
3. Маштаков Д.А., Автономов А.Н., Проездов П.Н. Защитные лесные насаждения в лесостепи Приволжской возвышенности : монография. Чебоксары, 2018. 419 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009760431?ysclid=llaucr3ret679718944>.
4. Balabanov V., Lee A., Norov B., Khudaev I., Egorov V. Investigation of various options for processing gray forest soil in a field crop rotation. E3S Web of Conferences. "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, Conmechhydro 2021". 2021;04025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404025>.
5. Гнусов М.А., Малюков С.В., Петков А.Ф. Виды и характеристики лесных пожаров. Воронежский научно-технический Вестник. 2020;1(31):140-146. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42732167>
6. Иванов А.С., Бай Р.Ф. Разработка и обоснование комбинированной почвообрабатывающей машины. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018;5(73):146-148. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vlmxhx&ysclid=llaum4kb5d931178950>.

7. Капов С.Н., Кожухов А.А., Герасимов Е.В., Хаустов П.А. Технологии почвозащитной обработки: пути развития. Вестник АПК Ставрополя. 2019;1(33):8-13. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zekgct&ysclid=llaup2dwij508136007>.
8. Костылева Л.В., Гапич Д.С., Моторин В.А., Новиков А.Е., Курбанов Д.Б. Повышение износостойкости почвообрабатывающих рабочих органов за счет структурирования высокоуглеродистых сплавов. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018;3(51):283-291. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36600072&ysclid=llaup2yjjg0943978978>.
9. Раднаев Д.Н., Дамбаева Б.Е. Повышение эффективности работы комбинированных машин и комплексов. Вестник ВСГУТУ. 2021;1(80):55-60. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44874751&ysclid=llay1qq5oc976265711>.
10. Халилов М.Б., Халилова К.М., Халилова М.М. Сравнительная оценка приемов и машин для обработки почвы. Известия Дагестанского ГАУ. 2022;3(15):37-43. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49514137&ysclid=llay4og2pc154486540>.
11. Халилов Ш.М., Халилов М.Б., Жук А.Ф. Комбинированные почвообрабатывающие машины и результативность их применения. Известия Дагестанского ГАУ. 2019;2(2):87-92. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41149411&ysclid=llay6qom42581225945>.
12. Шленкин А.К. Комбинированные орудия для обработки почв. Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов. Сборник материалов XI Международной научно-практической конференции. Редколлегия: Л.К. Гуриева [и др.]. Москва, 2022:124-130. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=dbltck&ysclid=llay8rxig2821161280>.
13. Aldoshin N., Mamatov F., Ismailov I., Ergashov G. Development of combined tillage tool for melon cultivation. 19th international scientific conference engineering for rural development Proceedings. 2020;19. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF175
14. Dzhaborov N.I., Dobrinov A.V., Eviev V.A. Evaluation of the energy parameters and agrotechnical indicators of aggregate for deep subsurface tillage. Journal of Physics: Conference Series. 2019;012036 DOI: 10.1088/1742-6596/1210/1/012036
15. Machindra R.A., Raheman H. Investigations on power requirement of active-passive combination tillage implement. Eng. Agric. Environ. Food. 2017;10(1):4-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.06.004>
16. Zhirnov A. Construction of active working machines for the care of seed-lings. Proceedings of the XXXVIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation». Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. 2022. DOI: 10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741
17. Бойков В.М., Старцев С.В., Воротников И.Л., Нарушев В.Б. Классификация машин для полосовой технологии обработки почвы. Аграрный научный журнал. 2020;5:72-76. DOI: 10.28983/asj.y2020i5pp72-76. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42897361&ysclid=llayj8gk57400217547>.
18. Догеев Г.Д., Халилов М.Б. Ресурсосберегающие технологии и машины для обработки почвы. Проблемы развития АПК региона. 2019;2(38):58-65. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39201910&ysclid=llayle7hl5137676202>.
19. Жук А.Ф., Беляева Н.И., Халилов М.Б. Рабочие органы для обработки почвы с водозадерживающим прерывистым бороздованием. Научная жизнь. 2019;3(91):337-347. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38472819>.
20. Grechishkina Y.I., Golosnoy E.V., Esaulko A.N., Sigida M.S., Ozheredova A.Y. Influence of cultivation technologies of agricultural crops with the use of machines and tools of domestic and foreign production for the dry area of the South of Russia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;315;5:052030. DOI: 10.1088/1755-1315/315/5/052030
21. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompactation by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 2021;723:032061. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032061

22. Petrov A.M., Ivanayskiy S.A., Kanaev M.A., [et al.] Justification of optimal design and technological parameters of needle discs of the combined working body. BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2019). 2020:00016. DOI: 10.1051/bioconf/20201700016
23. Бартенев И. М., Драпалюк М. В., Казаков В. И. Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления: монография. М.: ФЛИНТА : Наука, 2013. 208 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=renphn&ysclid=llaysdq165470824>.
24. Skirkus R., Jankauskas V., Gaidys R. Estimating stresses and movement work of a soil-cultivator tip using the finite-element method. Journal of friction and wear. 2016; 37(5):489-493. DOI: 10.3103/S1068366616050172
25. Латышева М.А. Исследование влияния регулировочных параметров стандартных навесных устройств тракторов на заглубляющую способность дисковых рабочих органов лесных безпорных орудий. Актуальные проблемы лесного комплекса. 2015;41:173-181. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23366084>.
26. Лысыч М.Н. Анализ конструкций дисковых рабочих органов почвообрабатывающих орудий и возможностей их применения в условиях лесных вырубок. Современные проблемы науки и образования. 2014;6:209. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=tgqept&ysclid=llayw3szih35533925>.
27. Григорьев И.В., Куницкая О.А., Рудов С.Е., Давтян А.Б. Пути повышения эффективности работы лесных машин. Энергия: экономика, техника, экология. 2020;1:55-63. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0233361920010085>.
28. Кулик К.Н., Бартенев И.М. Инновационная технология реконструкции и восстановления ползащитных лесных полос. Тракторы и сельхозмашины. 2018;5:3-8. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66369>.
29. Жук А.Ф., Халилов М.Б., Абдулнатилов М.Г. Технологии, приемы и технические средства для ресурсосберегающей обработки почвы. Проблемы развития АПК региона. 2020;4(44):52-58. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44429021&ysclid=llaz288ct270133585>.
30. Сучков Д.К. Технология выращивания ползащитных лесных полос в сухостепной и полупустынной зонах // Научно-агрономический журнал. 2019;3(106):7-10. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41420318>.
31. Сучков Д.К., Поташкина Ю.Н. Агротехнический уход за лесными культурами: цель, сроки и число уходов. Промышленность и сельское хозяйство. 2020;9(26):28-35. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44073255&ysclid=llaz91t2mv34353766>.
32. Upadhyay G., Raheman R. Performance of combined offset disc harrow (front active and rear passive set configuration) in soil bin. Journal of Terramechanics. 2018;78:27-37. DOI: 10.1016/j.jterra.2018.04.002
33. Zeng Z., Chen Y., Qi L. Soil cutting by a compact disc harrow having various disc arrangements. Trans. ASABE. 2019; 62:429-437. DOI: 10.13031/trans.13106.
34. Шовкопляс А.В. Обзор конструкций дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин. Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015; 4-2:109-116. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vntsud&ysclid=llazflqy5j513669932>.
35. Mutingi M., Dube P., Mbohwa C.A. Modular product design approach for sustainable manufacturing in a fuzzy environment. Procedia Manufacturing. 2017;8:471-478. DOI:10.1016/j.promfg.2017.02.060.
36. Абдрахманов Р.К., Кононов М.Д., Федоренко А.А. Анализ конструкций дисковых рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Современные достижения аграрной науки. 2021:10-16. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46610365&ysclid=llazvhma4y833726090>.
37. Ишмурадов Ш.У., Худойбердиев М.С.А.Ў., Гафуров Д.Р.Ў. Разработка ресурсосберегающего, эффективного способа восстановления ресурса рабочих органов со сферическим диском. Universum: технические науки. 2020;12-1(81):40-42. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44549353>.
38. Васильев А.С., Ивашнев М.В. Некоторые направления повышения эффективности функционирования дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих машин. Образование и наука в современных реалиях. 2017:286-288. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29654066&ysclid=llb0i0k6r258833666>.

39. Лысыч М.Н., Шевцова Е.П., Ермоленко С.А. Комбинированное многофункциональное почвообрабатывающее орудие. Молодой ученый. 2015;11(91):385-388. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23610154&ysclid=llb0pwn7691329624>.

40. Патент на полезную модель № 217468 U1 Российская Федерация, МПК А01G 23/00. Комбинированное почвообрабатывающее орудие : № 2022132835 : заявл. 14.12.2022 : опубл. 03.04.2023 / С. В. Малюков, Д. Ю. Дручинин, Е. В. Поздняков [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО "ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова". Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53733393>.

41. Лысыч, М. Н. Пространственное динамометрирование процесса преодоления препятствий рабочими органами почвообрабатывающих орудий на виртуальном стенде / М. Н. Лысыч // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9, № 1(33). – С. 167-175. – DOI 10.12737/article_5c920171c372b2.19385616. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/zfeehb>.

References

1. Posmetiev V.I., Zelikov V.A., Latysheva M.A., Posmetiev V.V. Osnovnye prichiny nedostatochnoj jeffektivnosti lesnyh pochvoobrabatyvajushhih agregatov i puti ee povyshenija [The main reasons for the insufficient efficiency of forest tillage machines and ways to improve it]. Voronezhskij nauchno-tehnicheskij Vestnik = Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2015;3-3(13):45-59. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24353760>.

2. Malyukov S.V., Aksenov A.A., Knyazev A.V., Borodin N.A., Solntsev A.V. Obzor konstrukcij pochvoobrabatyvajushhih mashin, primenjaemyh dlja mezhdurjadnoj obrabotki lesnyh kul'tur [A review of the designs of soil-cultivating machines used for inter-row cultivation of forest crops]. Voronezhskij nauchno-tehnicheskij Vestnik = Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2019;1 (27):107-118. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37604715>.

3. Mashtakov D.A., Avtonomov A.N., Proezdov P.N. Zashhitnye lesnye nasazhdenija v lesostepi Privolzh-skoj vozvyshehnosti : monografija [Protective forest plantations in the forest-steppe of the Volga Upland: monograph]. Cheboksary, 2018. 419 p. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01009760431?ysclid=llaucr3ret679718944>.

4. Balabanov V., Lee A., Norov B., Khudaev I., Egorov V. Investigation of various options for processing gray forest soil in a field crop rotation. E3S Web of Conferences. "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, Conmechydro 2021". 2021;04025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404025>.

5. Gnusov M.A., Malyukov S.V., Petkov A.F. Vidy i harakteristiki lesnyh pozharov [Types and characteristics of forest fires]. Voronezhskij nauchno-tehnicheskij Vestnik = Voronezh Scientific and Technical Bulletin. 2020;1(31):140-146. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42732167>

6. Ivanov A.S., Bai R.F. Razrabotka i obosnovanie kombinirovannoj pochvoobrabatyvajushhej mashiny [Development and justification of the combined tillage machine]. Izvestija Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = News of the Orenburg State Agrarian University. 2018;5(73):146-148. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vlmxhx&ysclid=llaum4kb5d931178950>.

7. Kapov S.N., Kozhukhov A.A., Gerasimov E.V., Khaustov P.A. Tehnologii pochvozashhitnoj obrabotki: puti razvitija [Soil protection technologies: ways of development]. Vestnik APK Stavropol'ja = Bulletin of the agro-industrial complex of Stavropol. 2019;1(33):8-13. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=zekgct&ysclid=llaup2dwij508136007>.

8. Kostyleva L.V., Gapich D.S., Motorin V.A., Novikov A.E., Kurbanov D.B. Povyshenie iznosostojkosti pochvoobrabatyvajushhih rabochih organov za schet strukturirovaniya vysokouglerodistykh splavov [Improving the wear resistance of soil-cultivating working bodies due to the structuring of high-carbon alloys]. Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie = News of the Nizhnevolzhsky agrouniversity complex: Science and higher professional education. 2018;3(51):283-291. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36600072&ysclid=llaup2yjjg0943978978>.

9. Radnaev D.N., Dambaeva B.E. Povyshenie jeffektivnosti raboty kombinirovannyh mashin i kompleksov [Improving the efficiency of combined machines and complexes]. Vestnik VSGUTU = Bulletin of the ESSTU. 2021;1(80):55-60. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44874751&ysclid=llay1qq5oc976265711>.

10. Khalilov M.B., Khalilova K.M., Khalilova M.M. Sravnitel'naja ocenka priemov i mashin dlja obrabotki pochvy [Comparative evaluation of techniques and machines for tillage]. *Izvestija Dagestanskogo GAU = Proceedings of the Dagestan State Agrarian University*. 2022;3(15):37-43. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49514137&ysclid=llay4og2pc154486540>.
11. Khalilov Sh.M., Khalilov M.B., Zhuk A.F. Kombinirovannye pochvoobrabatyvajushhie mashiny i rezul'tativnost' ih primenenija [Combined tillage machines and the effectiveness of their use]. *Izvestija Dagestanskogo GAU = Proceedings of the Dagestan State Agrarian University*. 2019;2(2):87-92 (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41149411&ysclid=llay6qom42581225945>.
12. Shlenkin A.K. Kombinirovannye orudija dlja obrabotki pochv [Combined implements for tillage]. *Aktual'nye problemy obshhestva, jekonomiki i prava v kontekste global'nyh vyzovov. Sbornik materialov XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Actual problems of society, economy and law in the context of global challenges. Collection of materials of the XI International Scientific and Practical Conference*. Moscow, 2022:124-130. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=dbltck&ysclid=llay8rxig2821161280>.
13. Aldoshin N., Mamatov F., Ismailov I., Ergashov G. Development of combined tillage tool for melon cultivation. 19th international scientific conference engineering for rural development *Proceedings*. 2020;19. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF175
14. Dzhaborov N.I., Dobrinov A.V., Eviev V.A. Evaluation of the energy parameters and agrotechnical indicators of aggregate for deep subsurface tillage. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;012036. DOI: 10.1088/1742-6596/1210/1/012036
15. Machindra R.A., Raheman H. Investigations on power requirement of active-passive combination tillage implement. *Eng. Agric. Environ. Food*. 2017;10(1):4-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eaef.2016.06.004>
16. Zhirnov A. Construction of active working machines for the care of seed-lings. *Proceedings of the XXXVIII International Multidisciplinary Conference «Recent Scientific Investigation»*. Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. 2022. DOI:10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741
17. Boikov V.M., Startsev S.V., Vorotnikov I.L., Narushev V.B. Klassifikacija mashin dlja polosovoj tehnologii obrabotki pochvy [Classification of machines for strip technology of tillage]. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal = Agrarian scientific journal*. 2020;5:72-76. DOI: 10.28983/asj.y2020i5pp72-76 (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42897361&ysclid=llayj8gk57400217547>.
18. Dogeev G.D., Khalilov M.B. Resursosberegajushhie tehnologii i mashiny dlja obrabotki pochvy [Resource-saving technologies and machines for tillage]. *Problemy razvitija APK regiona = Problems of development of the agro-industrial complex of the region*. 2019;2(38):58-65 (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39201910&ysclid=llayle7hl5137676202>.
19. Zhuk A.F., Belyaeva N.I., Khalilov M.B. Rabochie organy dlja obrabotki pochvy s vodozaderzhivajushhim preryvistym borozdovaniem [Working bodies for tillage with water-retaining intermittent furrowing]. *Nauchnaja zhizn' = Scientific life*. 2019;3(91):337-347. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38472819>.
20. Grechishkina Y.I., Golosnoy E.V., Esaulko A.N., Sigida M.S., Ozheredova A.Y. Influence of cultivation technologies of agricultural crops with the use of machines and tools of domestic and foreign production for the dry area of the South of Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;315;5:052030. DOI: 10.1088/1755-1315/315/5/052030
21. Kalinin A.B., Novikov M.A., Ruzhev V.A., Teplinsky I.Z. Improving the efficiency of the soil uncompactation by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2021;723:032061. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032061
22. Petrov A.M., Ivanayskiy S.A., Kanaev M.A., [et al.] Justification of optimal design and technological parameters of needle discs of the combined working body. *BIO Web of Conferences. International Scientific-Practical*

Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2019). 2020:00016. DOI: 10.1051/bioconf/20201700016

23. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V., Kazakov V. I. Sovershenstvovanie tehnologij i sredstv mehanizacii lesovosstanovlenija : monografija [Improvement of technologies and means of reforestation mechanization: monograph]. Moscow : FLINTA : Nauka, 2013. 208 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=renphn&ysclid=llaysydl65470824>.

24. Skirkus R., Jankauskas V., Gaidys R. Estimating stresses and movement work of a soil-cultivator tip using the finite-element method. Journal of friction and wear. 2016; 37(5):489-493. DOI: 10.3103/S1068366616050172

25. Latysheva M. A. Issledovanie vlijaniya regulirovochnyh parametrov standartnyh navesnyh ustrojstv traktorov na zaglubl'jajushhiju sposobnost' diskovyh rabochih organov lesnyh bezopornyh orudij [Investigation of the influence of adjusting parameters of standard tractor attachments on the deepening ability of disk working bodies of forest unsupported tools]. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa = Actual problems of the forest complex. 2015;41:173-181. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23366084>.

26. Lysych M. N. Analiz konstrukcij diskovyh rabochih organov pochvoobrabatyvajushhijh orudij i vozmozhnostej ih primenenijav uslovijah lesnyh vyrubok [Analysis of the designs of disk working bodies of soil-cultivating tools and the possibilities of their use in conditions of forest clearings] Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education. 2014;6:209. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=tgqept&ysclid=llayw3szih35533925>.

27. Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A., Rudov S. E., Davtyan A. B. Puti povysheniya jeffektivnosti raboty lesnyh mashin [Ways to improve the efficiency of forest machines]. Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija = Energy: economics, technology, ecology. 2020;1:55-63. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0233361920010085>.

28. Kulik K.N., Bartenev I.M. Innovacionnaja tehnologija rekonstrukcii i vosstanovlenija polezashhitnyh lesnyh polos [Innovative technology for the reconstruction and restoration of field-protective forest belts]. Traktory i sel'hozmashiny = Tractors and agricultural machines. 2018;5:3-8. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66369>.

29. Zhuk A.F., Khalilov M.B., Abdulnatipov M.G. Tehnologii, priemy i tehicheskie sredstva dlja re-sursosbergajushhej obrabotki pochvy [Technologies, techniques and technical means for resource-saving tillage]. Problemy razvitija APK regiona = Problems of development of the agro-industrial complex of the region. 2020;4(44):52-58. DOI 10.15217/issn2079-0996.2020.3.52 (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44429021&ysclid=llaz288ct270133585>.

30. Suchkov D.K. Tehnologija vyrashhivaniya polezashhitnyh lesnyh polos v suhostepnoj i polupustynnoj zonah [Technology of growing field-protective forest belts in the dry-steppe and semi-desert zones]. Nauchno-agronomicheskij zhurnal = Scientific and agronomic journal. 2019;3(106):7-10. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41420318>.

31. Suchkov D.K., Potashkina Yu.N. Agrotehnicheskij uhod za lesnymi kul'turami: cel', sroki i chislo uhodov [Agrotechnical care for forest crops: purpose, timing and number of care]. Promyshlennost' i sel'skoe hozjajstvo = Industry and agriculture. 2020;9(26):28-35. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44073255&ysclid=llaz91t2mv34353766>.

32. Upadhyay G., Raheman R. Performance of combined offset disc harrow (front active and rear passive set configuration) in soil bin. Journal of Terramechanics, 2018;78:27-37. DOI: 10.1016/j.jterra.2018.04.002

33. Zeng Z., Chen Y., Qi L. Soil cutting by a compact disc harrow having various disc arrangements. Trans. ASABE. 2019; 62:429-437. DOI: 10.13031/trans.13106.

34. Shovkoplyas A.V. Obzor konstrukcij diskovyh rabochih organov pochvoobrabatyvajushhijh mashin [Review of designs of disk working bodies of soil-cultivating machines]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. 2015; 4-2:109-116. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vntsud&ysclid=llazflqy5j513669932>.

35. Mutingi M., Dube P., Mbohwa C.A. Modular product design approach for sustainable manufacturing in a fuzzy environment. Procedia Manufacturing. 2017;8:471-478. DOI:10.1016/j.promfg.2017.02.060.

36. Abdrakhmanov R. K., Kononov M. D., Fedorenko A. A. Analiz konstrukcij diskovyh rabochih organov pochvoobrabatyvajushhih orudij [Analysis of the designs of disk working bodies of soil-cultivating implements] *Sovremennye dostizhenija agrarnoj nauki = Modern achievements of agrarian science*. 2021;10-16. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46610365&ysclid=llazvhma4y833726090>.

37. Ishmuradov Sh.U., Khudoyberdiev M.S.A.O., Gafurov D.R.O. Razrabotka resursosbergajushhego, jeffektivnogo sposoba vosstanovlenija resursa rabochih organov so sfericheskim diskom [Development of a resource-saving, effective method for restoring the resource of working bodies with a spherical disk] *Universum: tehniczeskie nauki = Universum: technical sciences*. 2020;12-1(81):40-42. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44549353>.

38. Vasiliev A.S., Ivashnev M.V. Nekotorye napravlenija povyshenija jeffektivnosti funkcionirovanija diskovyh rabochih organov lesnyh pochvoobrabatyvajushhih mashin [Some directions for improving the efficiency of the functioning of disk working bodies of forest tillage machines]. *Obrazovanie i nauka v sovremennyh realijah = Education and science in modern realities*. 2017:286-288. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29654066&ysclid=llb0i0k6r258833666>.

39. Lysych M.N., Shevtsova E.P., Ermolenko S.A. Kombinirovannoe mnogofunkcional'noe pochvoobrabatyvajushhee orudie [Combined multifunctional tillage tool] *Molodoj uchenyj = Young scientist*. 2015;11(91):385-388. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23610154&ysclid=llb0pwn7691329624>.

40. Malyukov S.V., Druchinin D.Yu., Pozdnyakov E.V. [et al] Combined tillage implement. Patent RF no. 217468. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53733393>.

41. Lysych, M. N. Spatial dynamometry of the process of overcoming obstacles by working bodies of tillage implements on a virtual stand / M. N. Lysych // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9, No. 1(33). – pp. 167-175. – DOI 10.12737/article_5c920171c372b2.19385616. – URL: <https://elibrary.ru/zfeehb>.

Сведения об авторах

✉ *Малюков Сергей Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2098-154X>, e-mail: malyukovsergey@yandex.ru

Лысыч Михаил Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru

Бухтояров Леонид Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vgta-mlx@yandex.ru

Поздняков Евгений Владиславович – кандидат технических наук, научный сотрудник патентного сектора научно-исследовательского отдела ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>, e-mail: pozd.ev@yandex.ru

Гнусов Максим Александрович – кандидат технических наук, руководитель лаборатории лесного машиностроения Инжинирингового центра ВГЛТУ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, e-mail: mgnusov@yandex.ru

Шавков Михаил Викторович – кандидат технических наук, специалист по снабжению ООО «Русгидроком», ул. Мазлумова, д. 25, г. Воронеж, Российская Федерация, 394040, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3700-7508>, e-mail: shavkovmv@mail.ru

Петков Александр Федорович – инженер кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: alexanderpetkoff@mail.ru

Information about the authors

✉ *Malyukov Sergey Vladimirovich* – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation; 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2098-154X>, e-mail: malyukovsergey@yandex.ru

Lysych Mikhail Nikolaevich – Cand. Sci. (Tech.), 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, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, e-mail: miklynea@yandex.ru.

Bukhtoyarov Leonid Dmitrievich – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: vgta-mlx@yandex.ru

Pozdnyakov Evgeny Vladislavovich – Cand. Sci. (Tech.), Research Fellow of the Patent Sector of the Research Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3904-867x>, e-mail: pozd.ev@yandex.ru;

Gnusov Maksim Aleksandrovich – Cand. Sci. (Tech.), Head of the Laboratory of Forestry Engineering of the Engineering Center of VGLTU, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1653-4595>, e-mail: mgnusov@yandex.ru

Shavkov Mikhail Viktorovich – Cand. Sci. (Tech.), Procurement Specialist RusHydrocom LLC, Mazlumova str., 25, Voronezh, Russian Federation, 394040, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3700-7508>, e-mail: shavkovmv@mail.ru

Petkov Aleksandr Fedorovich – engineer of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6348-8934>, e-mail: alexanderpetkoff@mail.ru.

✉ Для контактов/Corresponding author

Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/8>

УДК 630*307



Комплексное управление лесной растительностью: этапы и перспективы развития

Алексей А. Платонов¹ ✉, paa7@rambler.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4114-4636>

¹ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Россия

При формировании предприятиями лесопромышленного комплекса защитных лесных насаждений вдоль линейных инфраструктурных объектов возникает проблема последующего самопроизвольного размножения древесно-кустарниковой растительности, что приводит к беспорядку на территориях вышеуказанных объектов и создаёт угрозу безопасности их функционирования. Во многих зарубежных странах работы по поддержанию в нормативном состоянии территорий линейных объектов инфраструктуры выполняются в строгом соответствии с определёнными методами концептуального управления произрастанием растительности. При этом подобные методы управления практически неизвестны как отечественной научной общественности, занимающейся вопросами защитного лесоразведения, так и лицам, принимающим решения о необходимости воздействия на нежелательную древесно-кустарниковую растительность. Целью исследования являлось изучение и анализ системных методов управления произрастающей на территориях линейных инфраструктурных объектов нежелательной древесно-кустарниковой растительностью для повышения качества и эффективности её удаления, а также составления рекомендаций по надлежащему содержанию указанных территорий. Кластерный анализ направлений мировых исследований по управлению лесной растительностью выявил 3 крупных направления, связанных: с уменьшением или увеличением видового богатства и видового разнообразия растительности, а также недопустимостью последующего её возобновления; методами и способами воздействия на растительность, в том числе выгодами от управления растительностью; экологическими и эстетическими последствиями управления произрастанием растительности, а также общественным восприятием итогов такого управления. Выявленные принципы применения широко распространённой в мире системы интегрированного управления растительностью (Integrated Vegetation Management: IVM) в обязательном порядке учитываются организациями, ответственными за управление различными охранными зонами и полосами отчуждения. Наиболее удобным для охарактеризования выборочного подхода к управлению нежелательной растительностью, произрастающей на территориях линейных инфраструктурных объектов, является словосочетание «Комплексное управление лесной растительностью». В качестве базовой структуры системы IVM применяется модель, предложенная в 2005 г. Nowak С.А. и Ballard В.Д., и предусматривающая реализацию полного системного подхода при воздействии на растительность. Нецелесообразно совмещать в одном шаге (критической фазе указанной модели) мониторинг потенциального эффекта от воздействия на нежелательную растительность и оценку данного воздействия. При дальнейшем совершенствовании системы IVM необходимо создать комплекс чётко определённых и при этом подлежащих измерению показателей, в полной мере отражающих достигнутый (или – не достигнутый) эффект от воздействия на нежелательную растительность. Для внедрения в отечественную практику защитного лесоразведения системы IVM должны быть не отдельным инструментом управления растительностью, а комбинацией подходов к управлению, включая не только оценку участка линейного инфраструктурного объекта, но и последующий контроль и определение качества нормативного содержания данного участка.

Ключевые слова: инфраструктурный объект, растительность, удаление, интегрированное управление, системный подход, качество, мониторинг.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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


Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Платонов, А. А. Комплексное управление лесной растительностью: этапы и перспективы развития / А. А. Платонов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 142–157. – Библиогр.: с. 152–157 (42 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/8>.

Поступила 27.03.2023. *Пересмотрена* 02.07.2023. *Принята:* 14.08.2023. *Опубликована онлайн:* 18.09.2023

Review

Integrated forest vegetation management: stages and development prospects

Alexey A. Platonov¹✉, pa7@rambler.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-4114-4636>

¹*Rostov State Transport University, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, 2, Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation*

Abstract

When enterprises of the timber industry complex form protective forest plantations along linear infrastructure facilities, the problem of subsequent spontaneous reproduction of tree and shrub vegetation arises, which leads to disorder in the territories of the above facilities and creates a threat to the safety of their operation. In many foreign countries, work to maintain the territories of linear infrastructure facilities in a standard state is carried out in strict accordance with certain methods of conceptual management of vegetation growth. At the same time, such management methods are practically unknown both to the domestic scientific community dealing with the issues of protective afforestation, and to those who make decisions on the need to influence unwanted trees and shrubs. The purpose of the study was to study and analyze systemic methods for managing unwanted tree and shrub vegetation growing on the territories of linear infrastructure facilities in order to improve the quality and efficiency of its removal, as well as to make recommendations for the proper maintenance of these territories. Cluster analysis of world research trends in forest vegetation management revealed 3 major areas associated with: a decrease or increase in species richness and diversity of vegetation, as well as the inadmissibility of its subsequent renewal; methods and means of influencing vegetation, including the benefits of vegetation management; ecological and aesthetic consequences of vegetation management, as well as public perception of the results of such management. The established principles for the application of the integrated vegetation management system (Integrated Vegetation Management: IVM), which is widespread in the world, are necessarily taken into account by organizations responsible for managing various protected zones and right-of-way. The most convenient for characterizing a selective approach to the management of unwanted vegetation growing in the territories of linear infrastructure facilities is the phrase «Integrated forest vegetation management». As the basic structure of the IVM system, the model proposed in 2005 by Nowak and Ballard is used, which provides for the implementation of a complete systems approach when influencing vegetation. It is inappropriate to combine in one step (the critical phase of this model) the monitoring of the potential effect of the impact on unwanted vegetation and the assessment of this impact. With further improvement of the IVM system, it is necessary to create a set of clearly defined and at the same time measurable indicators that fully reflect the achieved (or not achieved) effect from the impact on unwanted vegetation. It

is shown that in order to introduce protective afforestation into domestic practice, IVM systems should not be a separate vegetation management tool, but a combination of management approaches, including not only the assessment of a plot of a linear infrastructure facility, but also subsequent control and determination of the quality of the normative maintenance of this plot.

Keywords: *infrastructure facility, vegetation, removal, integrated management, systems approach, quality, monitoring.*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Platonov A. A. (2023) Integrated Forest Vegetation Management: Stages and Development Prospects. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 142-157 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/8>.

Received: 27.03.2023. **Revised:** 02.07.2023. **Accepted:** 14.08.2023. **Published online:** 18.09.2023.

Введение

При формировании предприятиями лесопромышленного комплекса защитных лесных насаждений вдоль линейных инфраструктурных объектов (ЛИО, комплекса капитальных инженерных сооружений, обслуживающего производство, обеспечивающего условия жизнедеятельности общества и характеризуемого полной или частичной неразрывной связью с поверхностью, а также протяжённостью в пространстве, при этом длина объекта намного превышает его ширину) возникает проблема последующего самопроизвольного размножения древесно-кустарниковой растительности, что приводит к беспорядку на территориях вышеуказанных объектов и создаёт угрозу безопасности их функционирования. В рамках нормативного содержания ЛИО (в частности – полос отвода автомобильных и железных дорог, охранных зон линий электропередачи, а также газо- и нефтепроводов) с определённой периодичностью, обусловленной различными нормативными документами, выполняются работы по очистке территорий инфраструктурных объектов от нежелательной растительности. Однако указанные работы фактически повсеместно ведутся бессистемно и не учитывают целый ряд факторов, способствующих повышению качества и эффективности выполнения указанных работ. Между тем, во многих зарубежных странах вот уже

несколько десятилетий работы по поддержанию в нормативном состоянии территорий линейных объектов инфраструктуры (в первую очередь – охранных зон линий электропередачи) выполняются в строгом соответствии с определёнными методами концептуального управления произрастанием растительности, предусматривающими (в самом общем случае) реализацию нескольких предварительных (перед удалением растительности) и последующих (после удаления) этапов. Выполненным нами исследованием было установлено, что подобные методы управления практически неизвестны как отечественной научной общественности, занимающейся вопросами защитного лесоразведения, так и лицам, принимающим решения о необходимости воздействия на нежелательную древесно-кустарниковую растительность (НДКР).

Целью исследования являлось изучение и анализ системных методов управления произрастающей на территориях линейных инфраструктурных объектов нежелательной древесно-кустарниковой растительностью для повышения качества и эффективности её удаления, а также составления рекомендаций по надлежащему содержанию указанных территорий.

Для реализации сформулированной цели исследований необходимо было решить следующие задачи:

1. Выявить и проанализировать этапы создания и развития методов управления нежелательной растительностью.

2. Определить возможности и перспективы применения методов управления растительностью на территориях отечественных объектов линейной инфраструктуры.

Материалы и методы

Поиск необходимых сведений о существующих методах концептуального управления произрастающей нежелательной растительности осуществлялся по различным библиографическим источникам преимущественно зарубежных авторов с использованием баз данных Springer Nature, Scopus, MDPI, ResearchGate и Web of Science Core Collection. При подборе источников информации принималась во внимание как обзорная информация, так и публикации о результатах осуществлённых экспериментах в области управления растительностью на самых различных (в том числе – нелинейных) объектах инфраструктуры. Отдельное внимание уделялось перекрёстному цитированию (в том числе – их количеству) наиболее выдающихся публикаций в исследуемой области.

Для оценки достоверности проведённых исследований обработка полученного массива данных

проводилась с использованием программного пакета для статистического анализа Statistica StatSoft Russia.

Результаты и обсуждение

Для получения более объективных результатов изучения системных методов управления растительностью проводился их кластерный анализ, целью которого являлось выявление наиболее общих направлений мировых исследований в данной области. Формирование надёжной и объективной дифференциации указанной кластеризации осуществлялось с помощью метода иерархической классификации, не требующей предварительного определения количества кластеров, и метода k-means. В качестве правила объединения кластеров использовался метод Уорда, при этом в качестве целевой использовалась функция «Евклидово расстояние» как наиболее используемая мера для вычисления расстояния на плоскости между точками.

Осуществлённым нами информационным поиском было установлено, что тенденции мировых исследований по управлению лесной растительностью можно сгруппировать по трём основным темам, приведённым на рис. 1, а.

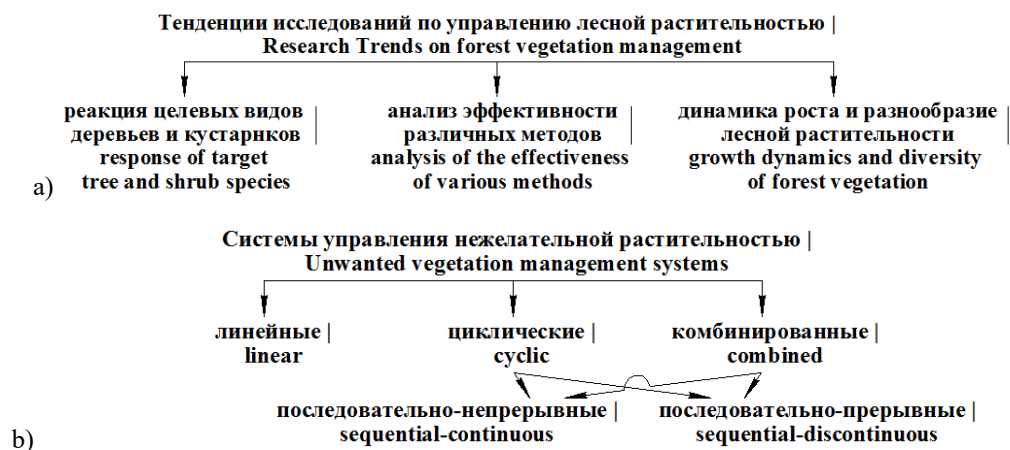


Рисунок 1. Тенденции исследований и классификация систем управления растительностью

Figure 1. Research trends and classification of vegetation management systems

(Источник: собственная разработка автора)

Source: own development of the author

При этом в части анализа эффективности различных методов управления нежелательной растительностью кластерный анализ показал концентрацию направлений исследований (рис. 2) на уменьшении или увеличении видового богатства и видового разнообразия растительности [1, 3, 5, 8, 10, 11, 18, 21, 24, 26, 29, 31], сохранности необходимых и недопустимости распространения инвазивных видов растений [4, 9, 13, 30], недопустимости последующего возобновления растительности [4, 5, 18, 21, 26, 33] (кластер C1), безопасности труда работников [4, 30, 31], методам и способам воздействия на растительность [2, 3, 15, 16, 20, 21, 26, 27, 42], экономическим последствиям (в т.ч. выгодам) от управления растительностью (например, [4, 10, 27, 31, 42]; в т.ч. Goodfellow J. «The Costeffi-

ciency of IVM. A Comparison of Vegetation Management Strategies for Utility Rights-of Way», 2020; кластер C2), отношениям участников и наблюдателей за процессом управления нежелательной растительностью (в т.ч. общественному восприятию итогов такого управления) [4, 6, 7, 13, 30, 31, 41, 42], экологическим последствиям (в т.ч. повышению природоохранной ценности территорий; например, [14, 16-18, 23, 28, 31, 32, 35-38, 41]; также Pietras-Couffignal K. ed al. «Future vegetation control of European Railways State-of-the-art report», 2021) и эстетической составляющей результатов управления растительностью (в том числе социальный контекст: доступ к природе; например, [12, 13, 19, 23, 31, 34, 40, 42]; в т.ч. Kocur-Bera K. ed al. «Roadside vegetation. The impact on safety», 2015; кластер C3).

Расстояние объединения |
Linkage Distance

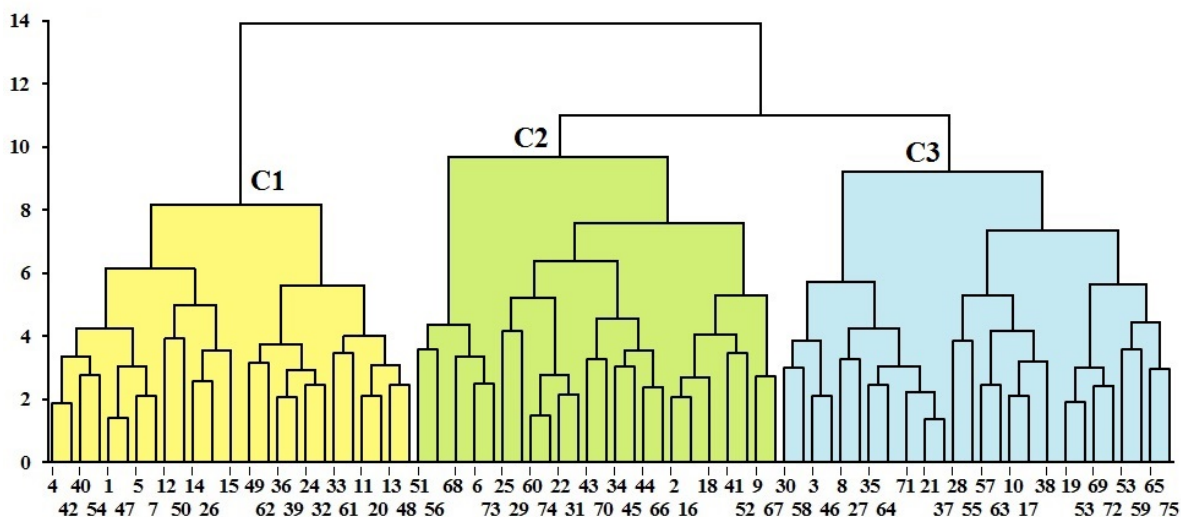


Рисунок 2. Дендрограмма распределения направлений мировых исследований в области управления растительностью

Figure 2. Dendrogram of the distribution of world research directions in the field of vegetation management

1. Arenas J.; 2. Bautista S.; 3. Below M.; 4. Bernes C.; 5. Bullock J.; 6. Byrd J.; 7. Camarretta N.; 8. Chiarucci A.; 9. Christodoulou G.; 10. Dudzinska M.; 11. Edwards J.; 12. Fassnacht F.E.; 13. Forster M.; 14. Gao L.; 15. Garcia P.; 16. Gaston K.; 17. Gonsamo A.; 18. Goodfellow J.; 19. Hale D.; 20. Harrison P.A.; 21. He W.; 22. Henderson D.; 23. Hu Y.; 24. Jackson D.R.; 25. Jakobsson S.; 26. Kattenborn T.; 27. Kocur-Bera K.; 28. Kolarik J.; 29. Koper N.; 30. Kornbluth S.; 31. Lampinen J.; 32. Layton C.W.; 33. Leston L.; 34. Leu J.M.; 35. Lopatin J.; 36. Losch M.; 37. Lynch A.J.; 38. Macova K.; 39. Maddox V.; 40. Mahan C.; 41. Marche B.; 42. Martin A.; 43. Mavrommatis A.; 44. McCarthy N.; 45. McLoughlin K.T.; 46. Mian S.; 47. Mola L.; 48. Molnar Z.; 49. Morzillo A.; 50. Nejatian A.; 51. Nemecek K.; 52. Nolte R.; 53. Osborne J.; 54. Parr T.W.; 55. Pellikka P.; 56. Phillips B.; 57. Pietras-Couffignal K.; 58. Russel K.; 59. Russell D.; 60. Schuler J.L.; 61. Somodi I.; 62. Stephenson A.L.; 63. Szoradova A.; 64. Tanner A.L.; 65. Thiffault N.; 66. Wang S.S.Y.; 67. Wang X.; 68. Wiens J.; 69. Wyatt S.; 70. Xu X.; 71. Yang Y.; 72. Yilmazer P.; 73. Zedler J.; 74. Zhao C.; 75. Zhu Q.

Источник: собственная разработка автора

Source: own development of the author

Интерес к вопросам концептуального моделирования растительного покрова, самопроизвольно образующегося (или – принудительно образуемого) на самых различных территориях, появился ещё в первой четверти XX века, при этом современные предлагаемые модели содержат типичные подходы или новые разработки, включая модели, основанные на различных принципах и учитывающие при этом не только характеристики произрастающей древесно-кустарниковой растительности, но и окружающей её среды.

Одной из первых работ, в которых была предпринята попытка создания концепции развития растительности, был труд А.Г. Тэнсли «The Classification of Vegetation and the Concept of Development» (1920 г.), где отмечалось, что классификация растительности должна основываться, прежде всего, на сумме её характеристик, а эмпирическое определение естественных единиц растительности, встречающихся в «полевых» условиях, является единственно надёжной основой классификации растительности.

Идея выборочного удаления нежелательной растительности для управления линейными инфраструктурными объектами (а именно – охранными зонами линий электропередачи) была впервые предложена 70 лет назад Ф.Е. Эглер «Vegetation management for roadside and rights-of-way» (1953 г.) и У.А. Ниринг «Principles of sound right-of-way vegetation management» (1958 г.) с многочисленными последующими повторными предложениями и уточнениями (Niering W.A., Goodwin R.H., 1974 г.; Dreyer G.D., Niering W.A., 1986 г.; Bramble W.C., Byrnes W.R., Hutnik R.J., 1990), при этом применение гербицидов представлялось как оптимальный способ борьбы с НДСР, сводящее к минимуму использование химикатов в долгосрочной перспективе.

В 1980-х годах выборочный подход к управлению нежелательной растительностью впервые сравнили с комплексной борьбой с вредителями (Integrated Pest Management: IPM), поскольку стало ясно, что выборочная борьба с древесно-кустарниковой порослью следует основным принципам IPM – «предотвращению» и «комплексному контролю» (Stern V.M. et al.) The integrated control

concept», 1959 г.). Поскольку не было ясно, применимы ли все предписания и принципы IPM к управлению растительностью в охранных зонах линий электропередачи, было разработано словосочетание «Интегрированное управление растительностью» (Integrated Vegetation Management: IVM; Jackson L.W. «A history of utility transmission right-of-way management», 1997 г.; McLoughlin K.T. «Integrated Vegetation Management. The exploration of a concept to application», 2002 г.). Практически сразу были предприняты успешные попытки применить IVM для других растительных систем: в частности, аналогичная фраза для описания систем управления нежелательной растительностью была введена для лесного хозяйства, а именно: «Комплексное управление лесной растительностью» (Integrated Forest Vegetation Management, IFVM; Wagner R.G. «Toward integrated forest vegetation management», 1994 г.). В ряде исследований (Ammer C. et al. «Forest vegetation management under debate: an introduction», 2011 г.; Wagner R.G. et al. «The role of vegetation management for enhancing productivity of the world's forests», 2006 г.) управление лесной растительностью (Forest vegetation management: FVM) определялось следующим образом: это обработка, направленная на снижение конкуренции за ресурсы участка (свет, питательные вещества, вода) между желаемыми деревьями и связанными с ними растениями или выращивание неурожайных видов для подавления нежелательных видов. Следует при этом отметить, что поскольку рассматриваемые ЛИО нередко находятся внутри лесных массивов, а также вдоль защитных лесных полос, то словосочетание «Комплексное управление лесной растительностью» нам представляется наиболее удобным для охарактеризования выборочного подхода к управлению нежелательной растительностью, произрастающей на территориях линейных инфраструктурных объектов.

В рамках IVM был разработан ряд ключевых её элементов, среди которых (McLoughlin K.T. «Application of integrated pest management to electric utility rights-of-way vegetation management», 1997 г.) разработка профилактических мер борьбы и акцент на биологические составляющие воздействия на нежелательную растительность, мониторинг ре-

зультатов воздействия, профессиональные (соответствующие современному уровню развития) способы, методы и технические средства воздействия, подтверждённая эффективность выполненных мероприятий.

В Меморандуме о взаимопонимании (Memorandum of Understanding: MOU) между Институтом электрики Эдисона, Ассоциацией коммунальных лесоводов и Лесной службой США (установившем рациональные методы IVM в качестве стандарта для управления полосами отвода ряда служб, 2016 г.) отмечалось, что подход IVM направлен на управление растительностью и окружающей средой путём нахождения оптимальных решений между расходами на осуществление воздействия; мониторингом полученных результатов; охраной окружающей среды; общественным здравоохранением; соответствием нормативным требованиям.

Отдельно в указанном Меморандуме акцентировалось внимание заинтересованных организаций на том, что стратегии IVM можно применять везде, где есть необходимость в управлении растительностью. Отмечалось, что программы IVM должны использоваться для управления растительностью вдоль полос отчуждения, чтобы сбаланси-

ровать безопасное, надёжное и рентабельное управление растительностью, сводя при этом к минимуму риск для здоровья человека и окружающей среды. При этом надлежащее управление растительностью необходимо для предотвращения проблем, связанных с плохо управляемой растительностью и чрезмерным её ростом, таких как нарушение обслуживания или функционирования; лесные пожары, эрозия и загрязняющие вещества; опасность для рабочих.

В 2005 г. Nowak С.А. и Ballard В.Д. («A Framework for Applying Integrated Vegetation Management on Rights-of-Way», 2005 г.) представили своё видение эволюции Интегрированного управления растительностью (IVM) как адаптацию модели интегрированной борьбы с вредителями (IPM) путём разработки полного системного подхода к реализации воздействия на растительность, которая, как оказалось впоследствии, стала базовой структурой системы IVM. В предложенной авторами системе IVM рассматривается как циклическая серия из шести шагов, формализующих отношения между критическими фазами управления растительностью (рис. 3):

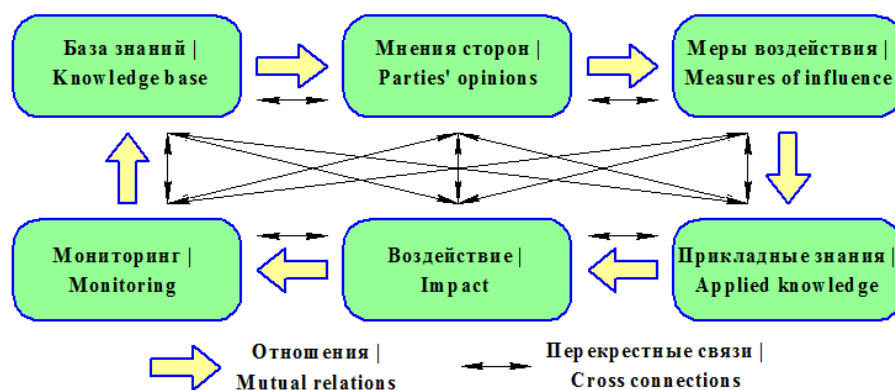


Рисунок 3. Отношения и перекрёстные информационные связи между критическими фазами управления растительностью (Nowak С.А., Ballard В.Д., 2005 г.)

Figure 3. Mutual relationships and cross information links between critical phases of vegetation management (Nowak С.А., Ballard В.Д., 2005)

(Источник: собственная разработка автора)

Source: own development of the author

Шаг 1: Получение базовых знаний о растительности – предусматривает как элементарное (начальное), так и углубленное (профессиональное)

экологическое понимание компонентов будущей управляемой системы (произрастающей нежелательной растительности) с целью выяснения осо-

бенностей взаимодействия указанной растительности с окружающей её экосистемой, а также возможных реакций растительности на внешние возмущения (а именно – управление);

Шаг 2: Выявление мнений заинтересованных сторон – предусматривает разработку и обоснование цели планируемого воздействия на растительность предприятиями, организациями и иными заинтересованными в качественном удалении нежелательной растительности сторонами, а также установку уровней толерантности к экологическим и инженерным параметрам указанного воздействия.

Шаг 3: Разработка мер воздействия – предусматривает обоснование полного спектра применяемых методов и средств удаления растительности. Отличительной особенностью системы IVM является невозможность планирования одного и того же управляющего воздействия на всех участках одного и того же ЛИО;

Шаг 4: Обобщение прикладных знаний – предусматривает учёт всех прямых и косвенных затрат на организацию работ по удалению НДКР, а также возможных последствий, оцениваемых обычно с помощью прикладных экологических показателей;

Шаг 5: Документирование мер воздействия и непосредственное воздействие на растительность – предусматривает представление определённого (в отношении конкретного участка ЛИО) документа со сформулированными мерами воздействия и согласованными ограничениями в отношении потребностей;

Шаг 6: Мониторинг – предусматривает организацию наблюдения за достигнутым (или – не достигнутым) эффектом от воздействия на нежелательную растительность, при этом результаты мониторинга являются основой для адаптивного управления и улучшения последующих воздействий.

Отличительной особенностью предложенной Nowak С.А. и Ballard В.Д. системы IVM является то, что элементы информации, полученные на каждом из шагов, можно использовать для как поддержки последующих шагов, так и для интегрирования в другие шаги путём организации перекрёстных информационных связей (рис. 3).

Подчеркнём, что предложенная Nowak С.А. и Ballard В.Д. система управления нежелательной растительностью включает в себя все этапы, предусмотренные большинством современных систем управления растительностью, а именно: этапы сбора информации, планирования, реализации, пересмотра и улучшения применяемых методов. При этом преимуществами рассматриваемой системы IVM являются:

- представление системы как серии циклических шагов, а не как линейной последовательности, что позволяет организовать управление растительностью на территории ЛИО принципиально на любом этапе очистки указанной территории от НДКР;
- акцентирование на непрерывном получении информации, интегрируемой в систему на каждом её этапе.

Указанные шаги этой (а также иных систем IVM) не привязаны к какому-либо конкретному календарному году. Вместо этого они представляют собой порядок, в котором их будут внедрять на конкретном участке инфраструктурного объекта для создания полностью работоспособной интегрированной системы управления нежелательной растительностью, позволяющей достичь наилучшего эффекта.

Выполненный нами анализ предложенной Nowak С.А. и Ballard В.Д. системы IVM выявил ряд её недостатков, а именно:

1. Отсутствует шаг (этап) оценки воздействия на нежелательную растительность по результатам проведённого мониторинга расчищенной от НДКР территории. Следует учесть, что мониторинг может быть организован лишь с целью дальнейшего наблюдения за возобновляющейся (в случае выполненного её удаления) или продолжающей расти (в случае некачественного её удаления) нежелательной растительностью без оценивания эффективности выполненных мероприятий. В тоже время трактование тех или иных результатов предусматривает осуществление предварительно выполненных действий по выявлению величин некоторого заранее обговорённого количества параметров, связанных в данном случае с произрастающей (или – удалённой) нежелательной растительностью. Такое выявление как раз и может быть осуществлено на

этапе мониторинга, при этом оценивание полученных результатов может представлять собой в свою очередь достаточно объёмную и сложную задачу, требующую не только глубоких знаний о произрастающей растительности и способах/методах её удаления, но и творческого подхода. С учётом этого, совмещение в одном шаге (критической фазе рассматриваемой системы) наблюдений (мониторинга) за эффектом от воздействия на нежелательную растительность и оценки данного воздействия нам представляется нецелесообразным и требующим выделения в отдельный шаг (этап) при дальнейшем совершенствовании системы IVM.

2. Предложенные к измерению в процессе осуществления мониторинга нежелательной растительности параметры не в полной мере отражают как суть процесса удаления НДКР, так и ожидаемые результаты удаления, пригодные для дальнейшего их оценивания. Авторами указанной системы IVM при мониторинге предлагается оценивать популяции деревьев, изменения в растительных сообществах с течением времени, загрязнения почвенного слоя и элементов инфраструктуры после их химической обработки, а также качество воды и сохранность популяций диких животных. При всей важности предложенных показателей, тем не менее, заметим, что с точки зрения необходимости очистки территории ЛИО от нежелательной растительности лишь 2 показателя из пяти отвечают на наш взгляд интересам вышеуказанной очистки (а именно: популяция деревьев и изменения в растительных сообществах), требуя при этом их однозначного растолкования. С учётом этого, нам представляется целесообразным при дальнейшем совершенствовании системы IVM создать комплекс чётко определённых и при этом подлежащих измерению показателей, в полной мере отражающих достигнутый (или – не достигнутый) эффект от воздействия на нежелательную растительность.

3. По ряду причин представляются не совсем реальными перекрёстные информационные связи между отдельными этапами интегрированного управления растительностью.

Совершенствование и развитие вышерассмотренной системы управления нежелательной растительностью, фактически принятой (с неболь-

шими улучшениями) в ряде зарубежных стран в качестве стандартной (ANSI A300 Integrated Vegetation Management Standard, Part 7, 2018), обусловлено стремлением организаций, ответственных за управление различными охраняемыми зонами и полосами отчуждения, повысить качество надлежащего содержания указанных территорий (Miller R.H. «Integrated Vegetation Management», 2021).

К настоящему времени системы интегрированного управления растительностью (Integrated Vegetation Management: IVM) получили уже достаточно широкое распространение, а принципы их применения в обязательном порядке учитываются организациями, ответственными за управление различными охраняемыми зонами и полосами отчуждения (фактически – независимо от типа ЛИО). Во многих случаях IVM – это глубокая и сложная система сбора информации, планирования, реализации, анализа и улучшения методов управления нежелательной растительностью. IVM используется для понимания ситуации об объекте исследования и его мониторинге, по результатам которого осуществляется обоснование и выбор тех или иных методов (способов) воздействия на растительность с общей целью выявления конкретных, экосистемно-чувствительных, экономически обоснованных и социально ответственных получаемых эффектов обработки территории, которые приводят к более точному достижению управления цели.

Обзор основных принципов создания и применения современных систем IVM позволил выявить, что в целом указанные системы подразделяются (рис. 1, б) на линейные (предполагающие фактически однократное исполнение всех необходимых при управлении растительностью этапов) [25], циклические (предполагающие многократное исполнение всех необходимых при управлении растительностью этапов) [22, 39] и комбинированные (предполагающие многократное исполнение некоторых необходимых при управлении растительностью этапов). При этом важным фактором успеха эффективной борьбы с нежелательной растительностью является установление процесса её управления, отражаемого в различных Планах и Руководствах по управлению, которые создаются

соответствующими организациями, ответственными за нормативное содержание участков ЛИО.

С учётом вышеизложенного, следует отметить, что правильно оценивая место и выбирая наиболее подходящую стратегию IVM, системы интегрированного управления растительностью могут принести многочисленные преимущества в рамках их применения на территориях отечественных объектов линейной инфраструктуры (полос отвода автомобильных и железных дорог, охранных зон линий электропередачи, газо- и нефтепроводов и иных), а именно:

- снизить общие затраты на управление растительностью;
- получить более безопасно управляемые объекты инфраструктуры;
- обеспечить более эффективный долгосрочный контроль и управление растительностью;
- снизить воздействие на окружающую среду (в т.ч. землю, воду, среду обитания насекомых и диких животных);
- уменьшить риски для здоровья человека.

По нашему представлению системы IVM должны быть не отдельным инструментом управления растительностью, а, скорее, комбинацией подходов к управлению, включая оценку участка ЛИО, последующий контроль и определение качества нормативного содержания указанного участка. При этом системы IVM являются как интегративными, так и специфичными для конкретного места. Одним из ключевых элементов системы IVM является разработка управленческих решений по методам воздействия на нежелательную растительность не для всего линейного инфраструктурного объекта на всём его протяжении, а для отдельных его участков. Следовательно, каждая программа (план, руководство) IVM должны быть разработаны с учётом индивидуальных целей, потребностей и ресурсов в контексте конкретной среды или условий, т.е. каждая программа IVM уникальна. Приспосабливая систему управления растительностью к потребностям организации, программы IVM объединяют соответствующие стратегии управления растительностью для обеспечения безопасного, рентабельного, надёжного обслуживания или функционирования инфраструктурного объекта при одновремен-

ном снижении рисков для окружающей среды и здоровья человека.

Выводы

1. Во многих зарубежных странах работы по поддержанию в нормативном состоянии территорий линейных объектов инфраструктуры выполняются в строгом соответствии с определёнными методами концептуального управления произрастанием растительности. При этом подобные методы управления практически неизвестны как отечественной научной общественности, занимающейся вопросами защитного лесоразведения, так и лицам, принимающим решения о необходимости воздействия на нежелательную древесно-кустарниковую растительность.

2. Кластерный анализ направлений мировых исследований по управлению лесной растительностью выявил 3 крупных направления, связанных: с уменьшением или увеличением видового богатства и видового разнообразия растительности, а также недопустимостью последующего её возобновления; методами и способами воздействия на растительность, в том числе выгодами от управления растительностью; экологическими и эстетическими последствиями управления произрастанием растительности, а также общественным восприятием итогов такого управления.

3. Установлено, что принципы применения широко распространённой в мире системы интегрированного управления растительностью (Integrated Vegetation Management: IVM) в обязательном порядке учитываются организациями, ответственными за управление различными охранными зонами и полосами отчуждения.

4. Показано, что наиболее удобным для охарактеризования выборочного подхода к управлению нежелательной растительностью, произрастающей на территориях линейных инфраструктурных объектов, является словосочетание «Комплексное управление лесной растительностью».

5. Раскрыто, что в качестве базовой структуры системы IVM применяется модель, предложенная в 2005 г. Nowak С.А. и Ballard В.Д., и предусматривающая реализацию полного системного подхода при воздействии на растительность.

6. Выявлена нецелесообразность совмещения в одном шаге (критической фазе указанной модели) мониторинга потенциального эффекта от воздействия на нежелательную растительность и оценки данного воздействия.

7. Обоснована необходимость при дальнейшем совершенствовании системы ИВМ создания комплекса чётко определённых и при этом подлежащих измерению показателей, в полной мере отражающих достигнутый (или – не достигнутый)

эффект от воздействия на нежелательную растительность.

8. Показано, что для внедрения в отечественную практику защитного лесоразведения территорий ЛИО различных типов системы ИВМ должны быть не отдельным инструментом управления растительностью, а комбинацией подходов к управлению, включая не только оценку участка ЛИО, но и последующий контроль и определение качества нормативного содержания данного участка.

Список литературы

1. 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>
2. Barker A., Prostak R. Management of Vegetation by Alternative Practices in Fields and Roadsides. *International Journal of Agronomy*. 2014;1:1-12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/207828>.
3. Bernes C., Bullock J.M., Jakobsson S. et al. How are biodiversity and dispersal of species affected by the management of roadsides? A systematic map. *Environmental Evidence*, 2017;6(1):24. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0103-1>
4. Byrd J., Maddox V., Russell D. Right of Way Integrated Vegetation Management: Essential to Keep the Us Economy Moving. *Outlooks on Pest Management*. 2020;31(5):201. DOI: https://doi.org/10.1564/v31_oct_02
5. Camarretta N., Harrison P.A., Bailey T. et al. Monitoring forest structure to guide adaptive management of forest restoration: a review of remote sensing approaches. *New Forests*. 2019;51(4):573. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09754-5>
6. DiFalco S., Morzillo A.T. Comparison of Attitudes towards Roadside Vegetation Management across an Exurban Landscape. *Land*. 2021;10(3):308. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10030308>
7. DiFalco S., Morzillo A.T., Ghosh D. Interpolating resident attitudes toward exurban roadside forest management. *Landscape Ecology*. 2022;1:16. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1310544/v1>
8. Fassnacht F.E., Latifi H., Stereńczak K. et al. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 2016;186:64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.013>
9. Fore S.R., Hill M.J. Modeling the potential natural vegetation of Minnesota. *Ecological Informatics*. 2017;41:116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.07.006>
10. Gao L., Wang X., Johnson B.A. et al. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020;159:364–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.018>
11. García P., Sanna M., Fernández García M. et al. Monitoring invasive alien plants dynamics: application in restored areas. *Biologia*. 2023;78(3):112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01375-w>
12. 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>
13. 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>
14. Hashad K., Yang B., Gallagher J. et al. Impact of roadside conifers vegetation growth on air pollution mitigation. *Landscape and Urban Planning*. 2023;229:104594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104594>.

15. Henderson D., Smith J., Fitch G. Impact of Vegetation Management on Vegetated Roadsides and Their Performance as a Low-Impact Development Practice for Linear Transportation Infrastructure. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2016;2588(1):172. DOI: <https://doi.org/10.3141/2588-19>
16. He W., Xu X., Zhang C. et al. Understory vegetation removal reduces the incidence of non-additive mass loss during leaf litter decomposition in a subtropical *Pinus massoniana* plantation. *Plant and Soil*. 2020;446(1-2):529. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04378-2>
17. Jumain M., Ibrahim Z., Ismail Z. et al. Influence of riparian vegetation on flow resistance in mobile bed straight compound channels. *Journal of Physics: Conf. Ser.* 2017;1049:012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1049/1/012027>
18. Kattenborn T., Lopatin J., Förster M. et al. UAV data as alternative to field sampling to map woody invasive species based on combined Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*. 2019;227:61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.025>
19. Kloster D.P., Morzillo A.T., Butler B.J. et al. Amenities, disamenities, and decision-making in the residential forest: An application of the means-end chain theory to roadside trees. *Urban Forestry*. 2021;65:127348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127348>.
20. Lampinen J., Anttila N. Reconciling road verge management with grassland conservation is met with positive attitudes among stakeholders, but faces implementation barriers related to resources and valuation. *Journal of Environmental Planning and Management*. 2020;64:1. DOI: <https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1785405>
21. Leston L., Koper N. An urban wildlife habitat experiment: conservation implications of altering management regimes on animals and plants along urban and rural rights-of-way. *Journal of Urban Ecology*. 2019;5(1):1. DOI: <https://doi.org/10.1093/jue/juz013>
22. Lynch A.J., Thompson L.M., Morton J.M. ed al. RAD Adaptive Management for Transforming Ecosystems. *BioScience*. 2022;72(1):45. DOI: <https://doi.org/10.1093/biosci/biab091>
23. Mácová K., Szórádová A., Kolařík J. Are Trees Planted along the Roads Sustainable? A Large-Scale Study in the Czech Republic. *Sustainability*. 2022;14(9):5026. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14095026>
24. Mahan C., Ross B., Yahner R. The Effects of Integrated Vegetation Management on Richness of Native Compatible Flowering Plants and abundance of Noncompatible Tree Species on a Right-of-Way in Central Pennsylvania, USA. *Arboriculture & Urban Forestry*. 2020;46(6): 395. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2020.029>
25. Marche B., Camargo M., Bautista S. ed al. Qualitative sustainability assessment of road verge management in France: An approach from causal diagrams to seize the importance of impact pathways. *Environmental Impact Assessment Review*. 2022;97(6). DOI: 106911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106911>
26. Martin A., Schuler J.L., Edwards J. Vegetation response to strip cutting young hardwood stands in West Virginia. *Journal of Sustainable Forestry*. 2017;36(2):58. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1373254>
27. Mavrommatis A., Christodoulou G. Velocity Distribution in Channels with Submerged Vegetation. *Fluids*. 2022;7(9):290. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids7090290>
28. McFalls J., Storey B., Das S. Long-Term Vegetation Management Strategies for Roadsides and Roadside Appurtenances. Washington, National Academies Press, 2023, 121 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/26876>
29. Nejatian A., Makian M., Gheibi M., Fathollahi-Fard A.M. A novel viewpoint to the green city concept based on vegetation area changes and contributions to healthy days: a case study of Mashhad. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(1):702-710. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15552-4>
30. Nemeč K., Stephenson A.L., Losch M. How Engineers and Roadside Vegetation Managers Maintain Roadside Vegetation in Iowa, USA. *Environmental Management*. 2022;70:593-604. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01683-y>
31. Phillips B., Bullock J., Osborne J., Gaston K. Ecosystem service provision by road verges. *Journal of Applied Ecology*. 2019;57(3):488. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13556>

32. Russell K., Russell G., Kaplan K. ed al. Increasing the conservation value of powerline corridors for wild bees through vegetation management: an experimental approach. *Biodiversity and Conservation*. 2018;27(12):2541. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1552-8>
33. Somodi I., Ewald J., Bede-Fazekas A., Molnár Z. The relevance of the concept of potential natural vegetation in the Anthropocene. *Plant Ecology and Diversity*. 2021;14(1):13. DOI: <https://doi.org/10.1080/17550874.2021.1984600>
34. Sterner S., Aslan C., Best R. Forest management effects on vegetation regeneration after a high severity wildfire: A case study in the southern Cascade range. *Forest Ecology and Management*. 2022;520(4):120394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120394>.
35. Suttle R., Kane B., Bloniarz D. Comparing the Structure, Function, Value, and Risk of Managed and Unmanaged Trees along Rights-of-Way and Streets in Massachusetts. *Forests*. 2022;13:1602. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101602>.
36. Tanner A.L., Leroux S.J. Effect of Roadside Vegetation Cutting on Moose Browsing. *PLoS ONE*. 2015;10(8):0133155. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133155>
37. Taylor W.O., Watson P.L., Cerrai D. et al. Dynamic modeling of the effects of vegetation management on weather-related power outages, *Electric Power Systems Research*. 2022;207:107840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107840>.
38. Totino M., Urdampilleta C.M., Ithuralde R.E. et al. A methodological approach for the analysis of ecosystem services from the local communities' perspective. *Ambio*. 2023;52:786-801. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-022-01807-y>
39. Wiens J., Zedler J., Rush V.H. et al. Facilitating Adaptive Management in California's Sacramento-San Joaquin Delta. *San Francisco Estuary and Watershed Science*. 2017;15(2):1-15. DOI: <https://doi.org/10.15447/sfews.2017v15iss2art3>
40. Willmert H., Osso J., Twiss M. Winter road management effects on roadside soil and vegetation along a mountain pass in the Adirondack Park. *Journal of Environmental Management*. 2018;225:215-223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.085>.
41. Yang Y., Zhu Q., Peng C. et al. A novel approach for modelling vegetation distributions and analysing vegetation sensitivity through trait-climate relationships in China. *Scientific Reports*. 2016;6:24110. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep24110>
42. Zhao C., Yang Y., Hu Y. Methodology, assessment and application of biotope mapping for urban parks in China: A case study on Riverside Park, Yichang. *Frontiers in Environmental Science*. 2022;10(8):362. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1008362>

References

1. 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>
2. Barker A., Prostack R. Management of Vegetation by Alternative Practices in Fields and Roadsides. *International Journal of Agronomy*. 2014;1:1-12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/207828>.
3. Bernes C., Bullock J.M., Jakobsson S. et al. How are biodiversity and dispersal of species affected by the management of roadsides? A systematic map. *Environmental Evidence*, 2017;6(1):24. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13750-017-0103-1>
4. Byrd J., Maddox V., Russell D. Right of Way Integrated Vegetation Management: Essential to Keep the Us Economy Moving. *Outlooks on Pest Management*. 2020;31(5):201. DOI: https://doi.org/10.1564/v31_oct_02
5. Camarretta N., Harrison P.A., Bailey T. et al. Monitoring forest structure to guide adaptive management of forest restoration: a review of remote sensing approaches. *New Forests*. 2019;51(4):573. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09754-5>

6. DiFalco S., Morzillo A.T. Comparison of Attitudes towards Roadside Vegetation Management across an Exurban Landscape. *Land*. 2021;10(3):308. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10030308>
7. DiFalco S., Morzillo A.T., Ghosh D. Interpolating resident attitudes toward exurban roadside forest management. *Landscape Ecology*. 2022;1:16. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1310544/v1>
8. Fassnacht F.E., Latifi H., Stereńczak K. et al. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 2016;186:64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.013>
9. Fore S.R., Hill M.J. Modeling the potential natural vegetation of Minnesota. *Ecological Informatics*. 2017;41:116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.07.006>
10. Gao L., Wang X., Johnson B.A. et al. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020;159:364–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.11.018>
11. García P., Sanna M., Fernández García M. et al. Monitoring invasive alien plants dynamics: application in restored areas. *Biologia*. 2023;78(3):112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01375-w>
12. 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>
13. 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>
14. Hashad K., Yang B., Gallagher J. et al. Impact of roadside conifers vegetation growth on air pollution mitigation. *Landscape and Urban Planning*. 2023;229:104594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104594>
15. Henderson D., Smith J., Fitch G. Impact of Vegetation Management on Vegetated Roadsides and Their Performance as a Low-Impact Development Practice for Linear Transportation Infrastructure. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2016;2588(1):172. DOI: <https://doi.org/10.3141/2588-19>
16. He W., Xu X., Zhang C. et al. Understory vegetation removal reduces the incidence of non-additive mass loss during leaf litter decomposition in a subtropical *Pinus massoniana* plantation. *Plant and Soil*. 2020;446(1-2):529. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04378-2>
17. Jumain M., Ibrahim Z., Ismail Z. et al. Influence of riparian vegetation on flow resistance in mobile bed straight compound channels. *Journal of Physics: Conf. Ser.* 2017;1049:012027. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1049/1/012027>
18. Kattenborn T., Lopatin J., Förster M. et al. UAV data as alternative to field sampling to map woody invasive species based on combined Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*. 2019;227:61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.025>
19. Kloster D.P., Morzillo A.T., Butler B.J. et al. Amenities, disamenities, and decision-making in the residential forest: An application of the means-end chain theory to roadside trees. *Urban Forestry*. 2021;65:127348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127348>
20. Lampinen J., Anttila N. Reconciling road verge management with grassland conservation is met with positive attitudes among stakeholders, but faces implementation barriers related to resources and valuation. *Journal of Environmental Planning and Management*. 2020;64:1. DOI: <https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1785405>
21. Leston L., Koper N. An urban wildlife habitat experiment: conservation implications of altering management regimes on animals and plants along urban and rural rights-of-way. *Journal of Urban Ecology*. 2019;5(1):1. DOI: <https://doi.org/10.1093/jue/juz013>
22. Lynch A.J., Thompson L.M., Morton J.M. et al. RAD Adaptive Management for Transforming Ecosystems. *BioScience*. 2022;72(1):45. DOI: <https://doi.org/10.1093/biosci/biab091>
23. Mácová K., Szórádová A., Kolařík J. Are Trees Planted along the Roads Sustainable? A Large-Scale Study in the Czech Republic. *Sustainability*. 2022;14(9):5026. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14095026>

24. Mahan C., Ross B., Yahner R. The Effects of Integrated Vegetation Management on Richness of Native Compatible Flowering Plants and abundance of Noncompatible Tree Species on a Right-of-Way in Central Pennsylvania, USA. *Arboriculture & Urban Forestry*. 2020;46(6): 395. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2020.029>
25. Marche B., Camargo M., Bautista S. et al. Qualitative sustainability assessment of road verge management in France: An approach from causal diagrams to seize the importance of impact pathways. *Environmental Impact Assessment Review*. 2022;97(6). DOI: 106911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106911>
26. Martin A., Schuler J.L., Edwards J. Vegetation response to strip cutting young hardwood stands in West Virginia. *Journal of Sustainable Forestry*. 2017;36(2):58. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1373254>
27. Mavrommatis A., Christodoulou G. Velocity Distribution in Channels with Submerged Vegetation. *Fluids*. 2022;7(9):290. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids7090290>
28. McFalls J., Storey B., Das S. Long-Term Vegetation Management Strategies for Roadsides and Roadside Appurtenances. Washington, National Academies Press, 2023, 121 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/26876>
29. Nejatian A., Makian M., Gheibi M., Fathollahi-Fard A.M. A novel viewpoint to the green city concept based on vegetation area changes and contributions to healthy days: a case study of Mashhad. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(1):702-710. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15552-4>
30. Nemecek K., Stephenson A.L., Losch M. How Engineers and Roadside Vegetation Managers Maintain Roadside Vegetation in Iowa, USA. *Environmental Management*. 2022;70:593-604. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01683-y>
31. Phillips B., Bullock J., Osborne J., Gaston K. Ecosystem service provision by road verges. *Journal of Applied Ecology*. 2019;57(3):488. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13556>
32. Russell K., Russell G., Kaplan K. et al. Increasing the conservation value of powerline corridors for wild bees through vegetation management: an experimental approach. *Biodiversity and Conservation*. 2018;27(12):2541. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-018-1552-8>
33. Somodi I., Ewald J., Bede-Fazekas A., Molnár Z. The relevance of the concept of potential natural vegetation in the Anthropocene. *Plant Ecology and Diversity*. 2021;14(1):13. DOI: <https://doi.org/10.1080/17550874.2021.1984600>
34. Sterner S., Aslan C., Best R. Forest management effects on vegetation regeneration after a high severity wildfire: A case study in the southern Cascade range. *Forest Ecology and Management*. 2022;520(4):120394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120394>
35. Suttle R., Kane B., Bloniarz D. Comparing the Structure, Function, Value, and Risk of Managed and Unmanaged Trees along Rights-of-Way and Streets in Massachusetts. *Forests*. 2022;13:1602. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101602>
36. Tanner A.L., Leroux S.J. Effect of Roadside Vegetation Cutting on Moose Browsing. *PLoS ONE*. 2015;10(8):0133155. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133155>
37. Taylor W.O., Watson P.L., Cerrai D. et al. Dynamic modeling of the effects of vegetation management on weather-related power outages. *Electric Power Systems Research*. 2022;207:107840. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107840>
38. Totino M., Urdampilleta C.M., Ithuralde R.E. et al. A methodological approach for the analysis of ecosystem services from the local communities' perspective. *Ambio*. 2023;52:786-801. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-022-01807-y>
39. Wiens J., Zedler J., Rush V.H. et al. Facilitating Adaptive Management in California's Sacramento-San Joaquin Delta. *San Francisco Estuary and Watershed Science*. 2017;15(2):1-15. DOI: <https://doi.org/10.15447/sfews.2017v15iss2art3>
40. Willmert H., Osso J., Twiss M. Winter road management effects on roadside soil and vegetation along a mountain pass in the Adirondack Park. *Journal of Environmental Management*. 2018;225:215-223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.085>

41. Yang Y., Zhu Q., Peng C. et al. A novel approach for modelling vegetation distributions and analysing vegetation sensitivity through trait-climate relationships in China. *Scientific Reports*. 2016;6:24110. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep24110>

42. Zhao C., Yang Y., Hu Y. Methodology, assessment and application of biotope mapping for urban parks in China: A case study on Riverside Park, Yichang. *Frontiers in Environmental Science*. 2022;10(8):362. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1008362>

Сведения об авторе

✉ *Платонов Алексей Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 344038, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4114-4636>, e-mail: paa7@rambler.ru.

Information about the author

✉ *Aleksey A. Platonov* – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Rostov State Transport University, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, 2, Rostov-on-Don, Russian Federation, 344038, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4114-4636>, e-mail: paa7@rambler.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>

УДК 621.225:69.002.51



Компьютерное моделирование рекуперативного кривошипного механизма поворота колонны манипулятора лесовозного автопоезда

Валерий И. Посметьев¹, posmetyev@mail.ru 0000-0001-9878-7451

Вадим О. Никонов¹✉, 8888nike8888@mail.ru 0000-0002-7380-9180

Виктор В. Посметьев¹, victorvp@mail.ru 0000-0001-6622-5358

Владимир А. Зеликов¹, zelikov-vrn@mail.ru 0000-0003-2317-9413

Петр В. Колодий², pkolody@mail.ru 0000-0001-6418-1531

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

²Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, ул. Мазурова – 59/34, г. Гомель, 246053, Республика Беларусь

Исследование направлено на повышение эффективности работы гидравлических манипуляторов лесовозных автопоездов, функционирующих в сложных природно-климатических условиях. Обоснована актуальность научного направления, нацеленная на сокращение потерь энергии в гидравлических приводах манипуляторов в процессе выполнения ими погрузочно-разгрузочных работ. Проанализированы работы зарубежных ученых, позволившие выделить перспективные направления улучшения эффективности гидравлических манипуляторов, включающие в себя разработку более современных приводов, повышение производительности, точности и автоматизации процессов их управления. С целью повышения энергоэффективности, производительности и надежности гидравлических манипуляторов лесовозных автопоездов, авторами была предложена перспективная конструкция поворотного механизма колонны с кривошипным приводом. Исследование базировалось на математическом и имитационном моделировании, численных методах, а также современных методах получения и обработки информации при компьютерной поддержке. Математическая модель и компьютерная программа работы гидравлического манипулятора с рекуперативным кривошипным приводом поворотного механизма колонны позволили оценить рекуперированную энергию и амплитуду раскачивания перемещаемого груза. При использовании гидравлического манипулятора, оснащенного предлагаемым кривошипным приводом, длина стрелы которого составляет в среднем 6 м, а масса перемещаемых лесоматериалов 600 кг, количество энергии, которое можно накопить в пневмогидравлическом аккумуляторе составляет около 1300 Дж. Угловая неравномерность показателей кривошипного привода составляет 23,6 % и 4,6 % при оценке по показателям рекуперированной энергии и амплитуды раскачивания груза соответственно. Для типичного гидравлического манипулятора с длиной стрелы 6 м при торможении поворота колонны система рекуперации позволяет запасти от 0,39 до 2,59 кВт при массе груза соответственно от 200 до 1400 кг, при приемлемой амплитуде раскачивания груза соответственно от 0,2 до 0,48 м. Полученные результаты будут использованы в качестве рекомендаций с целью доработки предлагаемого кривошипного привода поворотного устройства гидравлического манипулятора на стадии его проектирования.

Ключевые слова: лесовозный автопоезд, гидравлический манипулятор, рекуперация энергии рабочей жидкости, кривошипный привод поворота колонны, погрузка и разгрузка лесоматериалов, поворотный механизм, пневмогидроаккумулятор, математическое моделирование, эффективность, потери энергии.

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: Компьютерное моделирование рекуперативного кривошипного механизма поворота колонны манипулятора лесовозного автопоезда / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, В. А. Зеликов, П. В. Колодий // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 158–178. – Библиогр.: с. 174–177 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>.


Поступила 07.03.2023 Пересмотрена 12.08.2023 Принята 13.08.2023 Опубликована онлайн 18.09.2023


Article


Computer simulation of the recuperative crank mechanism for turning the column of the manipulator of a timber road train

Valerii I. Posmetev¹, posmetyev@mail.ru,  0000-0001-9878-7451

Vadim O. Nikonov¹✉, 8888nike8888@mail.ru,  0000-0002-7380-9180

Viktor V. Posmetev¹, victorvpo@mail.ru,  0000-0001-6622-5358

Vladimir A. Zelikov¹, zelikov-vrn@mail.ru,  0000-0003-2317-9413

Petr V. Kolodiy², pkolody@mail.ru,  0000-0001-6418-1531

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

²F. Skorina Gomel State University, st. Mazurova – 59/34, Gomel, 246053, Republic of Belarus

Abstract

The study is aimed at improving the efficiency of the hydraulic manipulators of timber-carrying road trains operating in difficult natural and climatic conditions. The relevance of the scientific direction is substantiated, aimed at reducing energy losses in the hydraulic drives of manipulators in the process of performing loading and unloading operations. The works of foreign scientists are analyzed, which made it possible to identify promising areas for improving the efficiency of hydraulic manipulators, including the development of more modern drives, increasing productivity, accuracy and automation of their control processes. In order to improve the energy efficiency, performance and reliability of hydraulic manipulators of timber road trains, the authors proposed a promising design of the column slewing mechanism with a crank drive. The study was based on mathematical and simulation modeling, numerical methods, as well as modern methods for obtaining and processing information with computer support. A mathematical model and a computer program for the operation of a hydraulic manipulator with a regenerative crank drive of the column slewing mechanism made it possible to estimate the recuperated energy and the swing amplitude of the transported load. When using a hydraulic manipulator equipped with the proposed crank drive, the boom length of which is on average 6 m, and the weight of the transported timber is 600 kg, the amount of energy that can be stored in the pneumohydraulic accumulator is about 1300 J. The angular unevenness of the crank drive is 23.6 % and 4.6 % when assessed in terms of recuperated energy and load swing amplitude, respectively. For a typical hydraulic manipulator with a boom length of 6 m, when braking the rotation of the column, the recuperation system allows to store from 0.39 to 2.59 kW with a load mass of 200 to 1400 kg, respectively, with an acceptable load swing amplitude, respectively, from 0.2 to 0.48 m. The obtained results will be used as recommendations for the purpose of finalizing the proposed crank drive of the rotary device of the hydraulic manipulator at the stage of its design.

Keywords: *timber road train, hydraulic manipulator, energy recovery of the working fluid, crank drive for turning the column, loading and unloading timber, turning mechanism, pneumohydraulic accumulator, mathematical modeling, efficiency, energy losses*

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., Kolodii P. V. (2023) Computer simulation of the recuperative crank mechanism for turning the column of the manipulator of a timber road train. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 158-178 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/9>.

Received 07.03.2023. *Revised* 12.08.2023. *Accepted* 13.08.2023. *Published online* 18.09.2023

Введение

Погрузка и разгрузка лесоматериалов, а также их вывозка потребителям лесовозными автопоездами являются наиболее затратными и энергоемкими операциями процесса лесозаготовки. Гидравлические манипуляторы играют важную роль в операциях погрузки и разгрузки лесоматериалов. Установка на лесовозные автопоезда гидравлических манипуляторов дает возможность при небольших объемах вывозимых лесоматериалов сократить время непроизводительного простаивания автопоездов на погрузочно-разгрузочных площадках, повысить их автономность, снизить конечную себестоимость лесоматериалов, и как следствие, повысить эффективность работы лесовозных автопоездов. К гидравлическим манипуляторам, работающим в сложных природно-климатических условиях для достижения необходимой точности позиционирования, а также и других параметров предъявляются более высокие требования. Уровень совершенства конструкций гидравлических манипуляторов, оптимальные значения геометрических и кинематических параметров их звеньев оказывают существенное влияние на их энергоемкость, материалоемкость и надежность [1, 2].

Повышению эффективности работы гидравлических манипуляторов посвящены научные исследования многих зарубежных авторов [3-18].

Ding R. и др. в своей статье представили новую систему электрогидравлического привода, позволяющего повысить энергоэффективность работы гидравлического манипулятора. Наличие в приводе независимого дозирующего клапана, многопараметрического контроллера, насоса с электронным управлением дает возможность за счет точного отслеживания движения при многорежимном пере-

ключении с изменяющимися во времени неопределенными характеристиками нагрузки сократить потенциальные потери энергии. По сравнению с обычной системой, предлагаемая многорежимная система переключения, использующая давление насоса с режимом управления клапанным расходомером, обеспечивает коэффициент энергосбережения 25,8 %, а с режимом дозирования клапана – 35,3 %. Кроме этого, установлено, что использование такого электрогидравлического привода в гидравлическом манипуляторе не ухудшает при осуществлении многорежимного переключения производительность отслеживания движения [3].

В научной работе Nurmi J. и др. рассмотрена проблема недостаточной эффективности использования энергии в гидравлических манипуляторах с четырьмя степенями свободы. Для повышения производительности, улучшения условий работы оператора, снижения потребления энергии рабочей жидкости при часто повторяющихся движениях гидравлического манипулятора, предложено оптимальное по энергии решение избыточности гидравлических манипуляторов на уровне взаимодействия привода, управляемого клапаном и гидроэнергетической системы. Разрешение избыточности способствует перемещению гидравлических цилиндров манипулятора энергетически оптимальным образом. Натурные испытания гидравлических манипуляторов с четырьмя степенями свободы в перспективных автоматизированных роботизированных приложениях, позволили установить, что потребление ими энергии рабочей жидкости на 15-30 % ниже в сравнении с традиционными решениями. В целом, полученные результаты демонстрируют оптимальное с точки зрения энергопотребления разрешение избыточности на уровне гидравличе-

ской системы в перспективных автоматизированных роботизированных приложениях [4].

Yang X. и др. в своей научной работе для гидравлических манипуляторов с n степенями свободы предложили новый адаптивный контроллер асимптотического отслеживания динамической поверхности на основе нейронной сети с гарантированными нейронными характеристиками. Для исследования создана модель системы манипулятора, включающая динамику гидропривода, разработан нейронный адаптивный контроллер динамической поверхности. Теоретический анализ показывает, что с помощью предлагаемого контроллера можно достичь как гарантированной производительности отслеживания переходных процессов, так и асимптотической устойчивости [5].

Renner A. и др. в своей работе предлагают новый подход к оценке динамических параметров полезной нагрузки, прикладываемой к звеньям манипулятора с гидравлическим приводом. Установлено, что оптимальный вариант загрузки автопоезда должен осуществляться с минимальным количеством рабочих циклов до своих пределов, не превышая их. Для этого разработаны коммерческие системы мониторинга полезной нагрузки, помогающие оператору оптимально осуществлять процесс погрузки-разгрузки. Существующие методы оценки динамических параметров звеньев манипулятора оценивают только массу полезной нагрузки и используют допущение относительно других их инерционных параметров. Новизна предлагаемого подхода заключается в его применимости к произвольным гидравлическим манипуляторам с систематической структурой, тогда как современные подходы обычно разрабатываются для конкретных конфигураций манипуляторов. Кроме этого, такой подход компенсирует влияние замкнутых кинематических цепей, а также трения в звеньях [6].

Cheng M. и др. в своей статье рассмотрели проблему недостаточного демпфирования в гидравлических системах манипуляторов, являющегося причиной возникновения колебаний, приводящих к ухудшению точности, производительности, а также ухудшению его комфорта. Выявлены преимущества и недостатки существующих пассивных

и активных методов, способствующих улучшению демпфирования. В связи с тем, что метод пассивного демпфирования сдерживается низкой гибкостью к изменению условий эксплуатации, в статье сделан акцент на использование метода активного демпфирования с внедрением электронного управления в гидравлические системы. Обратная связь по давлению для активного демпфирования является мощным методом снижения колебаний в гидравлических системах. Для снижения динамического удара, возбуждаемого силовым возмущением, предлагается метод многокритериальной оптимизации, учитывающий компромисс между необходимым демпфированием и небольшим динамическим воздействием [7].

В научной работе Petrovic G.R. и др. предложен новый подход к моделированию мощного гидравлического манипулятора с параллельно-последовательными конструктивными элементами. Каждый рассматриваемый параллельно-последовательный конструктивный элемент содержит вращающийся сегмент с жесткими звеньями, соединенными пассивным вращательным шарниром и приводимым в действие линейным гидроприводом, образуя замкнутый кинематический контур. Приведены уравнения общей динамики с использованием 6D-векторного представления для соответствующей параллельно-последовательной конфигурации гидравлического манипулятора. Представленный метод моделирования является более эффективным, поскольку формируется меньшее количество уравнений [8].

Zheng S. и др. в своем исследовании рассмотрели проблему глобальной энергетической оптимизации гидравлического манипулятора с тремя степенями свободы в случае плоского движения, когда существует превышение степени свободы для избыточности движения. В отличие от традиционных методов оптимизации энергопотребления, применяемых к манипуляторам с электрическим приводом, предлагаемый алгоритм динамического программирования с оптимизацией по энергопотреблению моделирует всю систему на гидравлическом уровне, который содержит динамические характеристики соединения давления и потока рабо-

чей жидкости между цилиндрами. Результаты численных расчетов траектории рабочего органа показывают, что алгоритм динамического программирования экономит около 10,49 % расхода гидравлической энергии в системе постоянного давления и 76,55 % в системе измерения нагрузки [9].

В работе Zhang X. и др. рассмотрены основные проблемы функционирования гидравлического манипулятора, которые заключаются в существенной нелинейности, неопределенностях, а также внешних возмущениях. Для улучшения характеристики отслеживания смещения манипулятора с несколькими степенями свободы, приводимого в движение гидравлическими цилиндрами, предложен адаптивный метод на основе наблюдателя с двойным расширенным состоянием. Построена математическая модель гидравлического манипулятора, включающая не только динамику гидравлического манипулятора, но и динамику гидропривода. Разработан контроллер динамической поверхности для управления нелинейностью и стабильностью замкнутой системы без обратной связи по скорости [10].

Han J. и др. в своей статье представили результаты проектирования и разработки механической конструкции и системы гидравлического привода автоматического манипулятора, а также метода управления слежением за его траекторией. Выполнен анализ прямой и обратной кинематики гидравлического манипулятора. В статье объединены способность нейронной сети к самообучению и способность нечеткой системы к лингвистическому выводу для настройки параметров пропорционального интегрально-дифференциального регулятора. Кроме этого, сформирован пропорциональный интегрально-дифференциальный регулятор для метода адаптивной нейро-нечеткой системы вывода, применяемый в процессе управления отслеживанием траектории гидравлического манипулятора. Результаты моделирования показывают, что предлагаемый регулятор имеет меньшую ошибку слежения, более высокую точность управления и лучший контрольный эффект при отслеживании траектории движения манипулятора [11].

В статье Lopatka M.J. и др. представлены результаты экспериментальных исследований, кото-

рые позволили оценить влияние применения уравновешивающих клапанов в гидроприводе на эффективность работы манипулятора. Установлено, что применение таких клапанов в широком диапазоне скоростей перемещения стрелы манипулятора по горизонтальной траектории позволит уменьшить пульсации давления в гидросистеме, ограничить колебания рабочего органа манипулятора, особенно в фазе торможения, повысить точность наведения рабочего органа, улучшить динамику работы манипулятора. Также установлено, что уменьшение пульсации давления рабочей жидкости сокращает время простоя между движениями на 15 %, что приводит к более быстрому выполнению погрузочных работ [12].

Truong H.V.A. и др. в своей статье предложили адаптивное нечеткое управление положением гидравлического манипулятора с тремя степенями свободы и с большим изменением полезной нагрузки. Гидравлический манипулятор использует электрогидравлические приводы в качестве первичных генераторов крутящего момента для увеличения полезной нагрузки. Следящее движение гидравлического манипулятора исследовалось при наличии внешней полезной нагрузки. Предложенное управление дает возможность улучшить работу гидравлического манипулятора с тремя степенями свободы при значительно изменяющейся полезной нагрузке [13].

Jensen K.J. и др. в своей работе представили новую концепцию электрогидростатического привода для гидравлического манипулятора. Предлагаемый привод исследован на предмет удержания нагрузки, управления перегрузкой, а также компенсации расхода рабочей жидкости. Управление положением гидроцилиндров основано на электрической сервосистеме, контролируемой давлением рабочей жидкости, а также включение и выключение клапанов удержания нагрузки. Установлена высокая эффективность предлагаемого привода в сравнении с традиционными конструкциями, в том числе за счет возможности рекуперации рабочей жидкости, снижающей на 82 % энергопотребление [14].

Li L. и др. в своей статье рассматривают актуальный вопрос, связанный с исследованием высокопроизводительных методов управления гид-

равлическими манипуляторами на основе использования пропорциональных клапанов. Предложена новая комплексная модель давления – расхода, учитывающая влияние люфта и входной нелинейности мертвой зоны на характеристики изменения давлений рабочей жидкости. Для подавления неблагоприятного влияния возможных нелинейностей и неопределенностей в системе предложен высокоточный адаптивный робастный метод управления. Доказана устойчивость замкнутой системы и требуемые характеристики управления предлагаемого регулятора. Получены сравнительные характеристики, обосновывающие эффективность и приоритет предлагаемой схемы управления гидравлическим манипулятором [15].

Xia Y. и др. в своем исследовании рассмотрели проблему управления гидравлическим манипулятором без обратной связи в сложных условиях эксплуатации, сопровождающихся медленным динамическим откликом и низкой точностью управления. Предложен нелинейный адаптивный робастный метод управления гидравлическим манипулятором. Для того чтобы сделать конструкцию управления более применимой, каждый шарнир манипулятора контролировался независимо, а не на прямую, на основе динамики его сцепления. Точность и эффективность управления обеспечивалась компенсацией адаптивной нелинейной модели, а также устойчивой конструкцией обратной связи. Установлено, что по сравнению с регуляторами с обратной связью и другими традиционными методами, адаптивный контроллер движения обеспечивает более высокую точность в исследуемых условиях с различными траекториями и положениями [16].

Zhou S. и др. в своей статье рассмотрели вопрос низкой точности управления гидравлическим приводом манипулятора при реализации способа двухстороннего телеуправления. Авторами предложена структура телеуправления для гидравлического манипулятора, основанная на гетерогенном согласовании ведущий – ведомый и нелинейном точном управлении движением, включающая алгоритм отображения рабочей области, интерполятор с ограничением скорости, решатель обратной кинематики, планировщик траектории и контроллер. На основе разработанной системы телеуправления реализовано высокоточное телеуправление гидравлического манипулятора с точностью работы до 0,02 м [17].

В статье Qian J. и др. рассмотрен вопрос влияния накопления статистических деформаций в точке захвата крупногабаритного гидравлического манипулятора на точность его управления. Авторы предложили метод компенсации статической деформации, основанный на обратной связи датчика наклона для крупногабаритных гидравлических манипуляторов, позволяющий уменьшить отклонение точки захвата. Данный метод компенсации статической деформации не требует учета множества граничных условий, которые в большинстве случаев являются неопределенными для крупногабаритных гидравлических манипуляторов. Кроме этого, такой метод обладает достаточной точностью, является универсальным для таких гидравлических манипуляторов, которые отличаются размерами и предельным нагружением [18].

Анализ результатов приведенных выше научных работ зарубежных авторов позволил выявить актуальные направления исследований, направленные на повышение эффективности работы гидравлических манипуляторов, задействованных в процессе погрузки, разгрузки, а также перемещения различных видов грузов. К этим направлениям относятся: разработка перспективных конструкций поворотных и подъемных устройств гидравлических манипуляторов; разработка энергоэффективных гидравлических, электрогидравлических и электрогидростатических приводов управления манипуляторами; исследование автоматизированных и роботизированных систем управления, систем мониторинга за нагруженностью поворотных и подъемных звеньев гидравлического манипулятора, а также электронного управления активным демпфированием, снижающим колебания давления рабочей жидкости в гидравлических системах; повышение производительности и осуществление оптимизации работы гидравлической и механической систем манипулятора; разработка методов управления слежением за траекторией движе-

ния поворотного и подъемных звеньев гидравлического манипулятора; улучшение точности управления звеньями манипулятора.

Среди этих направлений, особый интерес представляет исследование, связанное с повышением эффективности гидравлических манипуляторов путем снижения потерь энергии при их работе. Известно, что на энергоэффективность гидравлического манипулятора оказывают влияние три типа потерь энергии: механические и объемные потери насоса, а также потери на дросселирование рабочей жидкости в клапанах. Оптимизировать энергоэффективность гидравлических манипуляторов можно путем сокращения потерь на дросселирование рабочей жидкости в клапанах, так как несоответствие давления и расхода приводит к потере давления. Во время торможения колонны гидравлического манипулятора, опускания стрелы с грузом, кинетическая в первом случае, и потенциальная во втором случае энергии массы груза часто преобразуются в тепло, которое непроизводительно рассеивается в окружающее пространство. Рекуперация же этой энергии с одновременным снижением потерь давления рабочей жидкости при прохождении через клапаны, являются ключевыми моментами для повышения энергоэффективности гидравлических манипуляторов. В этой связи, разработка и исследование новых технических решений, основанных на рекуперации энергии рабочей жидкости, а также обеспечивающих не только повышение энергоэффективности, но и производительности, и надежности гидравлических манипуляторов лесовозных автопоездов в настоящее время является одним из приоритетных направлений совершенствования этой техники.

Результаты исследований, проведенных ранее авторами, позволили разработать перспективную конструкцию полноповоротного механизма колонны с кривошипным приводом гидравлического манипулятора, устанавливаемого как на лесовозных автопоездах, так и на другой спецтехнике, а также в стационарных условиях на промышленных предприятиях. Такой полноповоротный механизм с кривошипным приводом в сравнении с традиционным реечным механиз-

мом опорно-поворотного устройства обладает более простой конструкцией, меньшими габаритными размерами, массой, трудоемкостью в обслуживании, более высокими показателями надежности. Кроме этого, применение такого полноповоротного механизма с кривошипным приводом в конструкции гидравлического манипулятора дает возможность повысить точность его позиционирования, снизить воспринимаемые им динамические нагрузки, скачки давления рабочей жидкости в процессе пуска-тормозных режимах управления. Положительными особенностями предлагаемого полноповоротного механизма с кривошипным приводом гидравлического манипулятора являются обеспечение возможности реверсивного вращательного движения колонны, преобразования, накопления и полезного использования непроизводительно рассеиваемой кинетической энергии в процессе торможения колонны манипулятора. Эта особенность предлагаемого привода позволяет повысить производительности процесса погрузки и разгрузки лесоматериалов, а также снизить расход топлива лесовозным автопоездом (рис. 1) [19].

Цель работы достигается путем решения двух взаимосвязанных задач. Первая задача заключается в разработке математической модели работы гидравлического манипулятора с рекуперативным кривошипным приводом полноповоротного механизма колонны, позволяющей оценить рекуперированную энергию и амплитуду раскачивания перемещаемого груза. Вторая – заключается в выявлении зависимостей изменения рекуперированной энергии и амплитуды раскачивания груза от угла торможения поворота колонны с кривошипным приводом и массы груза с помощью разработанной компьютерной программы.

Материалы и методы

Объектом исследования является процесс погрузки и разгрузки лесоматериалов гидравлическим манипулятором, оснащенным рекуперативным кривошипным приводом поворота его колонны. В качестве предмета исследования рассматриваются закономерности изменения рекуперированной энергии и амплитуды раскачивания груза от угла торможения поворота колонны и массы груза.

Для изучения особенностей работы гидравлического манипулятора с предлагаемым кривошипным приводом полноповоротного механизма

колонны и возможности оснащения его системой рекуперации энергии использовалось математическое моделирование.

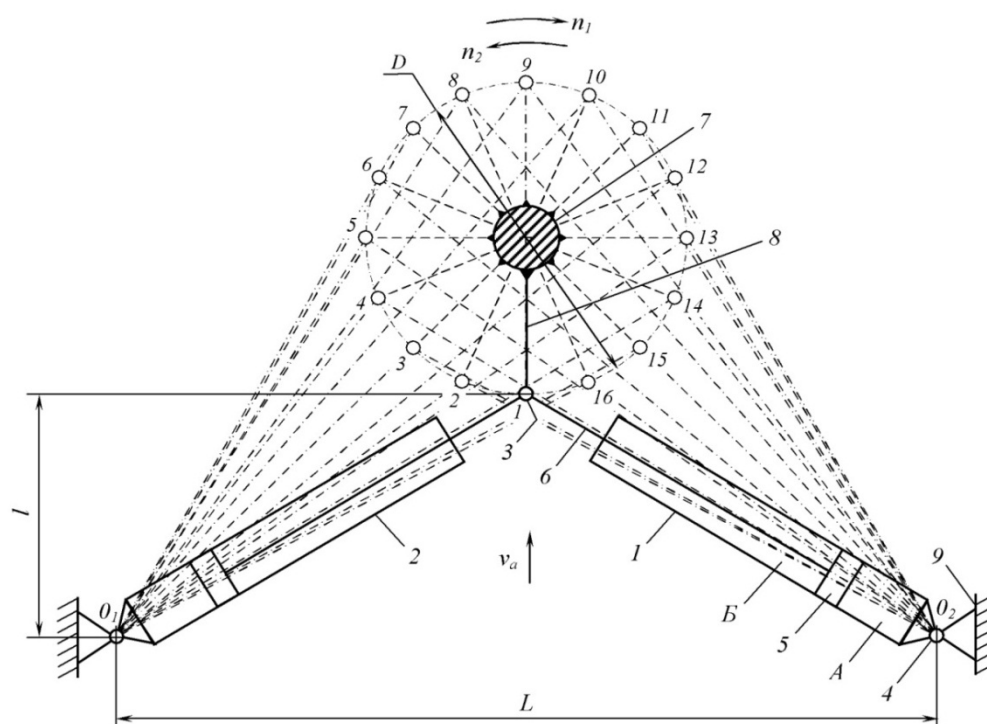


Рисунок 1. Перспективная конструкция полноповоротного механизма колонны гидроманипулятора:

n_1 и n_2 – направление поворота колонны; v_a – направление движения лесовозного автомобиля;
A и *B* – поршневая и штоковая полости гидроцилиндра, соответственно; *1, 2* – гидроцилиндры; *3, 4* – шарниры;
5 – поршни; *6* – штоки; *7* – колонна гидроманипулятора; *8* – кривошип; *9* – рама

Figure 1. Perspective design of the full-rotation mechanism of the hydraulic manipulator column:

n_1 and n_2 – the direction of rotation of the column; v_a – the direction of movement of the timber vehicle;
A and *B* – piston and rod cavities of the hydraulic cylinder, respectively; *1, 2* – hydraulic cylinders; *3, 4* – hinges;
5 – pistons; *6* – rods; *7* – hydraulic manipulator column; *8* – crank; *9* – frame

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

Современные методы моделирования позволяют с достаточно высокой детализацией и физической адекватностью воспроизводить процессы в механических и гидравлических системах. Моделирование основано на расчетных методах классической механики и гидравлики [20-21].

В рамках математической модели описание гидравлического манипулятора лесовозного автопоезда осуществляется системой дифференциальных и алгебраических уравнений. Решение этой системы уравнений выполняется на основе числен-

ного интегрирования, при котором осуществляется выявление временных зависимостей исследуемых параметров, характеризующих эффективную работу гидравлического манипулятора с предлагаемым кривошипным приводом полноповоротного механизма колонны. Модель исследуемого гидравлического манипулятора состоит из двух подсистем: механической, описывающей движение манипулятора и груза в виде бревна в пространстве, а также гидравлической подсистемы, описывающей функ-

ционирование элементов гидросистемы, в частности гидроцилиндров и пневмогидроаккумулятора.

Так как основной задачей является исследование поворота колонны гидравлического манипулятора, рассматривается двухмерная модель манипулятора в горизонтальной плоскости XOZ (рис. 2).

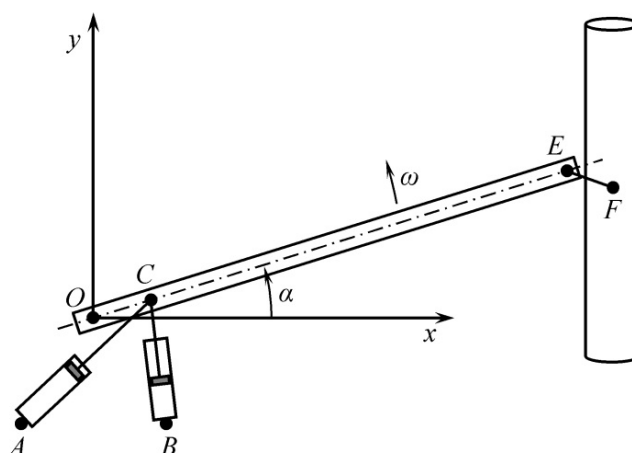


Рисунок 2. Расчетная схема гидравлического манипулятора, оснащенного кривошипным приводом поворота колонны, используемая для создания математической модели

Figure 2. Calculation scheme of a hydraulic manipulator equipped with a crank drive for the rotation of the column, used to create a mathematical model

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

В разрабатываемой математической модели принято допущение, заключающееся в том, что стрела гидравлического манипулятора и груз (пачка бревен) представлены в виде единых твердых тел (рис. 2). Гидроцилиндры AC и BC вызывают ускорение или торможение вращения стрелы, воздействуя на точку C стрелы. Угловое положение стрелы гидравлического манипулятора задается углом α , который определяется от направления оси OX против хода часовой стрелки. Положение в пространстве груза задается координатами x_F, y_F . Обобщенная система уравнений, описывающая механическую подсистему, составлена на основе основного закона динамики вращательного движения и второго закона Ньютона.

Полноповоротный механизм колонны с кривошипным приводом представляется в виде абсолютно твердого тела, которое вращается относительно вертикальной оси Z . Угловое расположение

Механическая подсистема модели включает в себя стрелу манипулятора, совершающую вращательное движение вокруг точки O и груз (пачка бревен), связанный со стрелой грейферным устройством EF .

полноповоротного механизма колонны с кривошипным приводом задается углом φ , который определяется от направления оси OX против хода часовой стрелки. Описание поворота колонны гидравлического манипулятора с помощью кривошипного привода осуществлялось на основании следующих уравнений динамики вращательного движения:

$$\begin{cases} J \frac{d^2 a}{dt^2} = -k_T \frac{da}{dt} + F_{AC} \cdot OM + F_{BC} \cdot ON + \\ + F_{Fx} EF \sin \beta - F_{Fy} EF \cos \beta; \\ m_6 \frac{d^2 x_F}{dt^2} = F_{Fx} = -c(x_F - x_E) - \zeta \left(\frac{dx_F}{dt} - \frac{dx_E}{dt} \right); \\ m_6 \frac{d^2 y_F}{dt^2} = F_{Fy} = -c(y_F - y_E) - \zeta \left(\frac{dy_F}{dt} - \frac{dy_E}{dt} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где J – момент инерции колонны гидравлического манипулятора с кривошипным приводом, приведенный к центру вращения O ; t – время; k_T – значение коэффициента трения при повороте ко-

лонны; F_{AC} и F_{BC} – силы, действующие со стороны гидравлических цилиндров на полноповоротный механизм колонны; OM и ON – плечи сил F_{AC} и F_{BC} ; F_{Fx} и F_{Fy} – составляющие силы, действующей со стороны стрелы гидравлического манипулятора на груз в грейферном захвате; EF – расстояние между точками крепления грейферного захвата E и центром тяжести груза F ; β – угол ориентации вектора EF к оси OX ; m_6 – масса пачки бревен; c и ζ – коэффициенты жесткости и демпфирования в упруго-вязком приближении взаимодействия груза с концом стрелы гидравлического манипулятора.

С учетом того, что гидравлический манипулятор представляется в модели телом, состоящим из стрелы в виде однородного стержня длиной L_G и массой m_C , а также колонны в виде сплошного цилиндра радиусом R_{OK} и массой m_{OK} , то момент инерции определяется по следующей формуле:

$$J = \frac{1}{3} m_C L_G^2 + \frac{1}{2} m_{OK} R_{OK}^2. \quad (2)$$

Силы, действующие со стороны гидроцилиндров кривошипного привода полноповоротного механизма гидравлического манипулятора F_{AC} и F_{BC} рассчитываются по формуле:

$$F_{AC} = (P_{n1} - P_{u1}) \cdot \frac{\pi D_\Gamma^2}{4}, \quad (3)$$

$$F_{BC} = (P_{n2} - P_{u2}) \cdot \frac{\pi D_\Gamma^2}{4}, \quad (4)$$

где P_{n1} , P_{n2} и P_{u1} , P_{u2} – значения давлений рабочей жидкости в поршневых и соответственно штоковых полостях гидравлических цилиндров AC и BC ; D_Γ – рабочий диаметр гидравлического цилиндра.

Система рекуперации, которой оснащен гидропривод манипулятора, позволяет преобразовывать, накапливать и полезно использовать энергию, выделяющуюся при торможении поворота колонны гидравлического манипулятора. В процессе торможения поворота колонны гидравлического манипулятора происходит существенное возрастание давления в поршневой полости одного из гидроцилиндров и штоковой полости второго. Благодаря всплеску давления часть рабочей жидкости через элементы рекуперативного гидропривода направляется в пневмогидравлический

аккумулятор. Использование системы рекуперации позволяет не только запастись энергиею торможения вращения колонны, но и снизить отрицательное воздействие резких перепадов давления на элементы гидропривода.

В рамках модели пачка бревен массой m_6 , перемещаемый гидравлическим манипулятором представлен в виде материальной точки, совпадающей с центром тяжести пакета лесоматериалов. В разработанной двумерной модели удержание центра тяжести груза F вблизи точки крепления грейферного захвата E осуществляется за счет сил упругого и вязкого трения.

Представление в математической модели гидравлической подсистемы манипулятора выполнено аналогично представлению, приведенному в ранее опубликованных авторами работах [20, 21].

Уравнения вращательного движения полноповоротного механизма колонны гидравлического манипулятора, используемые в математической модели, представляют собой дифференциальные уравнения второго порядка. Для решения таких уравнений применяется метод Рунге-Кутты второго порядка. В частности, уравнение динамики вращательного движения полноповоротного механизма колонны с кривошипным приводом решается следующим образом:

$$\alpha^k = \alpha^{k-1} + \omega^{k-1} \Delta t + \frac{\varepsilon^k (\Delta t)^2}{2}; \quad (5)$$

$$\omega^k = \omega^{k-1} + \varepsilon^k \Delta t, \quad (6)$$

где k и $k-1$ – текущий и предыдущий шаги интегрирования по времени; α , ω и ε – угол ориентации манипулятора в горизонтальной плоскости, угловая скорость и угловое ускорение. Аналогичным образом численно интегрируются уравнения движения груза.

Основным показателем, характеризующим эффективность системы рекуперации гидропривода поворотного механизма колонны с кривошипным приводом, является энергия $E_{пп}$, запасаемая в пневмогидравлическом аккумуляторе за одно торможение поворота колонны:

$$E_p = \int_0^{t_{\kappa 2}} P_{ППА}(t) Q_{ППА}(t) dt, \quad (7)$$

где $t_{кв}$ – длительность компьютерного эксперимента по повороту колонны от угла α_1 до угла α_2 ; $P_{ПГА}$ – давление рабочей жидкости в пневмогидравлическом аккумуляторе; $Q_{ПГА}$ – скорость поступления (расход) рабочей жидкости в пневмогидравлический аккумулятор. В случае многократной циклической погрузки рекуперированная энергия E_p является наибольшей для первого цикла, и постепенно снижается для последующих циклов по мере заполнения пневмогидравлического аккумулятора.

Вторым важным показателем эффективности является амплитуда раскачивания груза A_F при торможении колонны манипулятора, определяемого как

$$A_F = \max_{t_T < t < t_{кв}} \sqrt{(x_E - x_F)^2 + (y_E - y_F)^2}, \quad (8)$$

где t_T – момент времени, в который начинается торможение полноповоротного механизма колонны гидравлического манипулятора.

Рекуперативная система, в зависимости от ее параметров, позволяет, как снизить, так и усилить раскачивание пакета бревен по сравнению с серийным гидравлическим манипулятором.

В процессе дальнейшего теоретического исследования необходимо выполнить минимизацию амплитуды раскачивания груза A_F и максимизацию рекуперированной энергии рабочей жидкости E_p .

Для предварительного исследования предлагаемого полноповоротного механизма колонны с кривошипным приводом авторами разработана на языке Object Pascal в среде программирования Borland Delphi 7.0 компьютерная программа «Программа для моделирования работы полноповоротного механизма колонны гидравлического манипулятора с кривошипным приводом» (рис. 3).

Разработанная программа дает возможность осуществлять компьютерные эксперименты в процессе работы полноповоротного механизма колонны гидравлического манипулятора, с целью оптимизации конструктивных параметров рекуперативного полноповоротного механизма колонны с кривошипным приводом. Кроме этого, эта программа позволяет задавать в исходном коде геометрические параметры манипулятора, параметры рекуперативного гидропривода, а также технологического

процесса. В процессе работы программы манипулятор перемещает пачку бревен от заданных начального и конечного положений. При торможении вращения колонны в конечном угловом положении производится оценка рекуперированной энергии рабочей жидкости. Программа непрерывно выводит на экран компьютера схематическое изображение гидравлического манипулятора на проекции сверху, график зависимости от времени скорости вращения полноповоротного механизма колонны с кривошипным приводом, числовые значения текущей рекуперированной мощности и накопленной рекуперированной энергии (рис. 3).

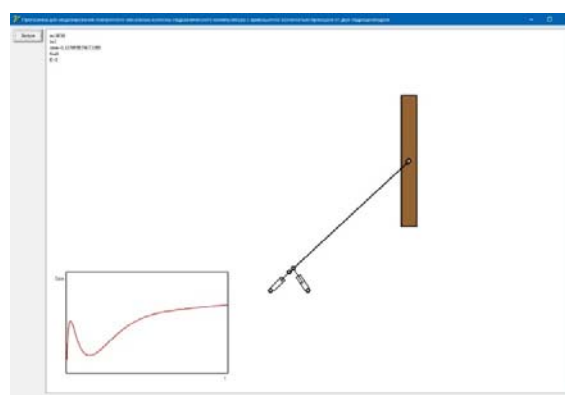


Рисунок 3. Интерфейсная форма вывода результатов компьютерного эксперимента
Figure 3. Interface form for displaying the results of a computer experiment

Источник: собственная схема авторов
Source: authors' own scheme

Основные входные параметры разработанной модели можно разделить на три группы (рис. 4).

Первая группа входных параметров представляет собой технологические параметры: α_1 – начальный угол ориентации манипулятора в горизонтальной плоскости; α_2 – конечный угол ориентации манипулятора в горизонтальной плоскости. Ко второй группе входных параметров относятся параметры системы рекуперации: D_T – диаметр гидроцилиндров кривошипного привода; $V_{ПГА}$ – объем пневмогидравлического аккумулятора. Третья группа входных переменных представляет собой параметры груза – бревна или пакета лесоматериалов. Наиболее существенным из параметров является: m_B – масса груза.

Эффективность кривошипного привода гидроманипулятора оценивалась двумя показателями: E_p – запасаемая в пневмогидравлическом аккумуляторе энергия рабочей жидкости за одно торможение вращения колонны; A_F – амплитуда раскачивания груза.

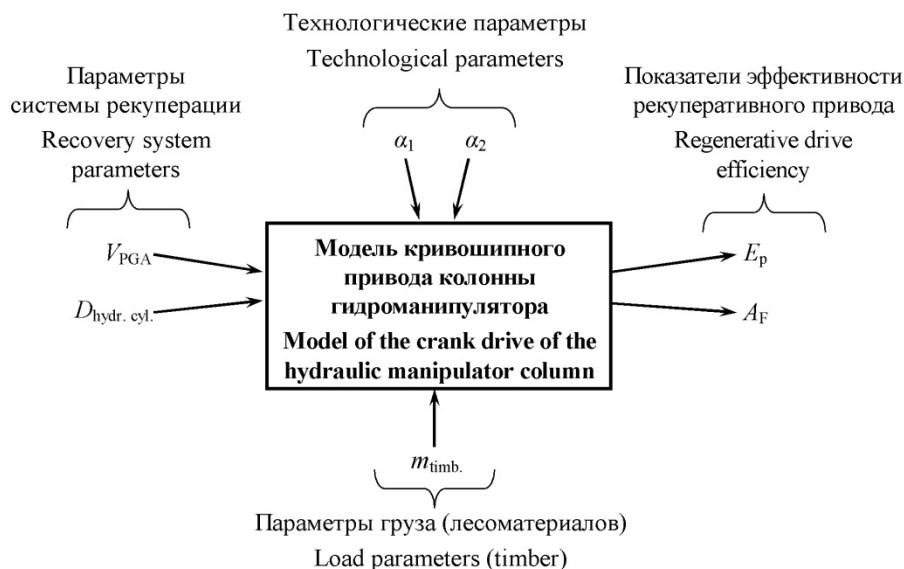


Рисунок 4. Входные параметры и выходные характеристики разработанной математической модели
Figure 4. Input parameters and output characteristics of the developed mathematical model

Источник: собственная схема авторов
Source: authors' own schema

тор с кривошипным приводом во вращение и последующим торможением вращения колонны. В базовых компьютерных экспериментах масса груза составляла 600 кг. Поворот колонны манипулятора производился на 90° . При этом задавали конечный угол α_2 , при котором необходимо остановить вращение колонны и рассчитывали начальный угол $\alpha_1 = \alpha_2 - 90^\circ$. В базовом компьютерном эксперименте начальный угол $\alpha_1 = 0^\circ$ соответствовал захвату бревна сбоку от лесовозного автопоезда (рис. 5, а), а угол торможения полноповоротного механизма колонны манипулятора $\alpha_1 = 90^\circ$ соответствовал помещению бревна на платформу лесовозного автопоезда (рис. 5, б).

В начале компьютерного эксперимента производилась подача высокого давления в полости гидроцилиндров кривошипного привода, благодаря чему скорость вращения ω стрелы гидравлического манипулятора возрастала, с некоторыми колебаниями до примерно 20° в секунду (рис. 6, а). Когда угол пово-

Результаты и обсуждения

Базовый компьютерный эксперимент заключался в однократном приведении полно поворотного механизма колонны гидравлического манипуля-

рота стрелы манипулятора достигал целевого значения 90° (в момент времени 5,5 с) гидроцилиндры кривошипного привода переключались в режим торможения с рекуперацией. При этом скорость вращения полноповоротного механизма колонны быстро уменьшалась и после некоторых колебаний вблизи нулевой отметки вращение останавливалось.

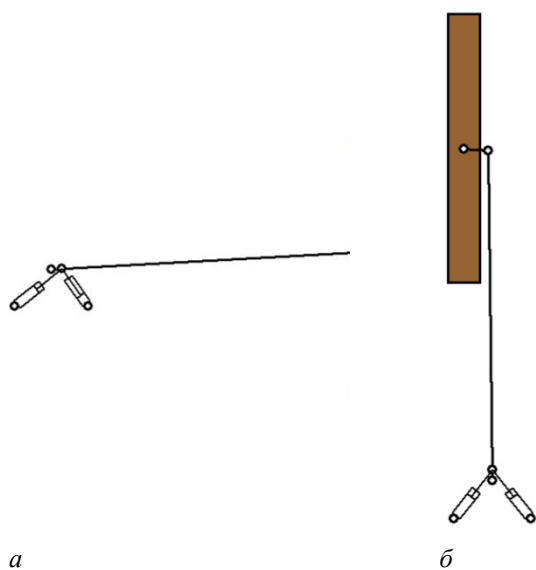


Рисунок 5. Положение стрелы и пакета бревен в начале компьютерного эксперимента (а) и при

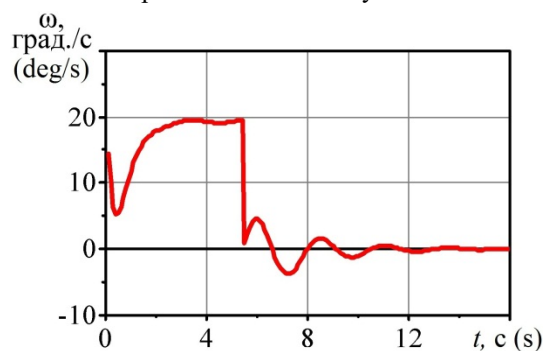
остановке манипулятора (б)

Figure 5. The position of the boom and the pack of logs at the beginning of the computer experiment (a) and at the stop of the manipulator (b)

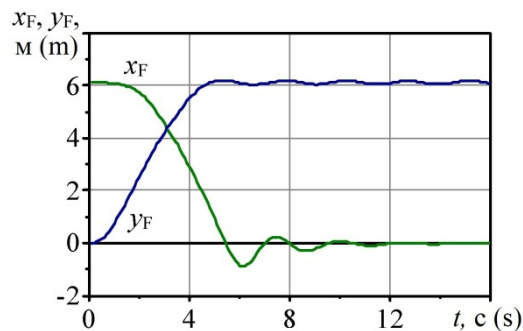
Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

Как видно из графиков координат центра тяжести груза от времени $x_F(t)$ и $y_F(t)$ груз раскачивается в моменты резкого изменения угловой скорости,



а



б

Рисунок 6. Зависимость от времени t угла α поворота манипулятора (а) и координат x_F, y_F центра пакета бревен (б)

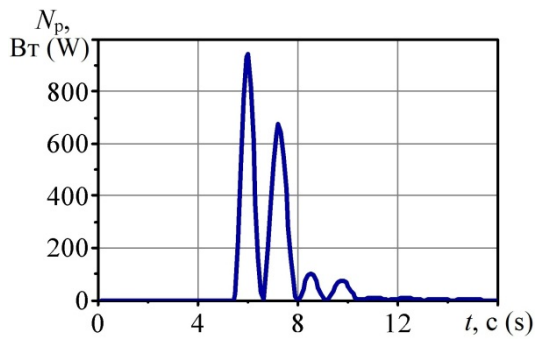
Figure 6. Dependence on time t of the angle α of rotation of the manipulator (a) and the coordinates x_F, y_F of the center of the package of logs (b)

Источник: собственные вычисления авторов

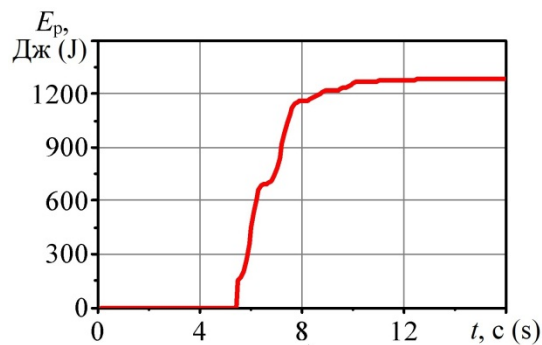
Source: authors' own calculations

рости стрелы (рис. 6, б). При начале вращения стрелы центр тяжести груза F запаздывает с перемещением по окружности по сравнению с концом стрелы E (рис. 5, а). При остановке вращения стрелы гидравлического манипулятора груз продолжает двигаться по инерции в тангенциальном направлении и амплитуда отклонения центра тяжести от точки крепления грейферного захвата может достигать до 0,5 м (рис. 5, б).

Система рекуперации преобразует неблагоприятные колебания стрелы в энергию рабочей жидкости, накапливаемую в пневмогидравлическом аккумуляторе. Поэтому на графике зависимости от времени мгновенной рекуперированной мощности $N_p(t)$ видны пики, соответствующие постепенно затухающим колебаниям стрелы (рис. 7, а). Пиковые значения рекуперированной мощности достигают почти 1 кВт.



а



б

Рисунок 7. Зависимость от времени t рециперированной мощности N_p (а) и рециперированной энергии E_p (б)

Figure 7. Dependence on time t of the recuperated power N_p (a) and the recuperated energy E_p (b)

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Накопленная энергия рабочей жидкости E_p за одно торможение поворота составляет около 1300 Дж. При этом практически вся энергия рабочей жидкости (1150 из 1300 Дж) преобразуется за время от 5,6 с до 7,6 с (рис. 7, б). Установлено также, что при использовании гидравлического манипулятора, оснащенного предлагаемым кривошипным приводом, длина стрелы которого составляет 6 м, а масса перемещаемых лесоматериалов 600 кг, количество энергии, которое можно накопить в пневмогидравлическом аккумуляторе составляет около 1300 Дж. Такое количество энергии рабочей жидкости позволит гидравлическому манипулятору поднять лесоматериалы массой 600 кг на высоту 22 см. Учитывая тот факт, что необходимая погрузочная высота поднятия стрелы гидравлического ма-

нипулятора с грузом составляет порядка 4 м, использование накопленной энергии рабочей жидкости при повороте колонны с грузом позволит сократить энергоемкость операции подъема стрелы на 11 %. При торможении механизма колонны с кривошипным приводом, энергия рабочей жидкости за счет рекуперативного гидропривода поступает в пневмогидравлический аккумулятор, современные конструкции которых, обладают энергоемкостью до 100 кДж. Это дает возможность накапливать энергию рабочей жидкости от порядка 75 циклов поворота механизма колонны с кривошипным приводом, и далее осуществить в режиме полезного использования накопленной энергии до 6 подъемов стрелы с грузом массой 600 кг на платформу лесовозного автопоезда.

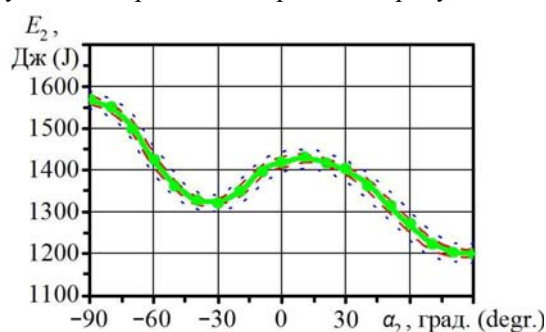
Так как кривошипный привод полноповоротного механизма колонны гидравлического манипулятора не симметричен относительно оси вращения колонны манипулятора, возникает вопрос о том, как эффективность привода и системы рекуперации энергии зависит от углов начала и окончания поворота.

С целью исследования угловой зависимости выполнена серия компьютерных экспериментов, при осуществлении которых изменяли угол α_2 торможения поворота с шагом 10° в интервале от -90° до 90° . При этом угол начала вращения α_1 отстоял от угла α_2 на 90° .

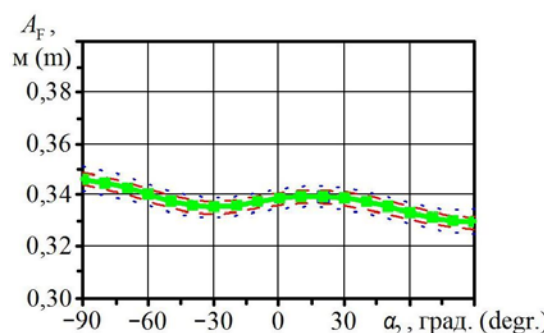
На рисунках 8 и 10 кроме точек, выявленных в результате компьютерного моделирования, показаны зеленые сплошные кривые, представляющие собой результат аппроксимации методом наименьших квадратов полиномом второго порядка, красные штриховые линии – границы доверительного интервала (confidence band) со статистической достоверностью 0,95, пунктирные синие линии – границы интервала прогнозирования (prediction band) со статистической надежностью 0,95.

Установлено влияние угла остановки поворота на рециперированную энергию и амплитуду раскачивания груза: получены S-образные зависимости (рис. 8). При угле торможения поворота, соответствующем направлению стрелы в сторону гидроцилиндров (рис. 9, а) достигается максимальная рециперированная мощность 1571 Дж (рис. 8, а) и

максимальная амплитуда раскачивания груза 0,346 м (рис. 8, б). При угле торможения поворота, соответствующем направлению стрелы в сторону,



а



б

Рисунок 8. Зависимость рециркулируемой энергии E_p и амплитуды раскачивания груза A_F от угла

α_2 торможения поворота колонны манипулятора

Figure 8. Dependence of the recuperated energy E_p

and the amplitude of the swing of the load A_F on the angle α_2 of deceleration of the rotation of the manipulator column

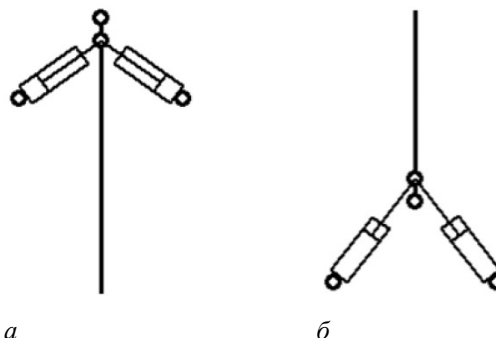
Источник: собственные вычисления авторов

Source: authors' own calculations

противоположному расположению гидроцилиндров (рис. 9, б) рециркулируемая мощность 1201 Дж минимальна; также минимальна и амплитуда раскачивания груза 0,330 м.

Таким образом, для достижения максимального рециркулятивного эффекта целесообразно располагать гидроцилиндры кривошипного привода по одну сторону с точкой C воздействия гидроцилиндров по отношению к оси O вращения колонны.

Для несимметричного гидропривода вращения колонны, возникает вопрос о характерной величине угловой неравномерности. Оценка угловой неравномерности по рециркулируемой энергии дает значение $(1571 - 1201) / 1571 = 23,6 \%$. Оценка по амплитуде раскачивания груза дает значение неравномерности $(0,346 - 0,330) / 0,346 = 4,6 \%$. Таким



а

б

Рисунок 9. Положения стрелы и гидроцилиндров кривошипного привода, соответствующие углам торможения поворота колонны манипулятора для наибольшей величины рециркулируемой

энергии (а) – $\alpha_2 = -90^\circ$, $E_p = 1571$ Дж и наименьшей (б) – $\alpha_2 = 90^\circ$, $E_p = 1201$ Дж

Figure 9. The positions of the boom and hydraulic cylinders of the crank drive, corresponding to the angles of deceleration of the rotation of the manipulator column for the greatest value of the recuperated energy (а) – $\alpha_2 = -90^\circ$, $E_p = 1571$ J and the lowest (б) – $\alpha_2 = 90^\circ$, $E_p = 1201$ J

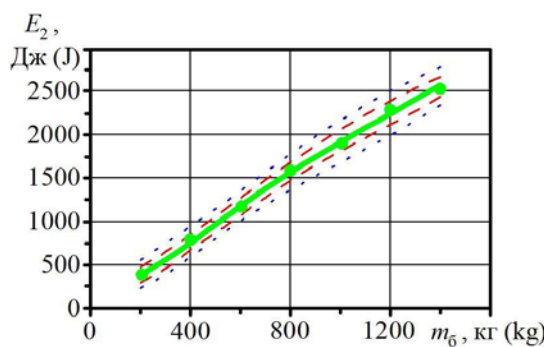
Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own schema

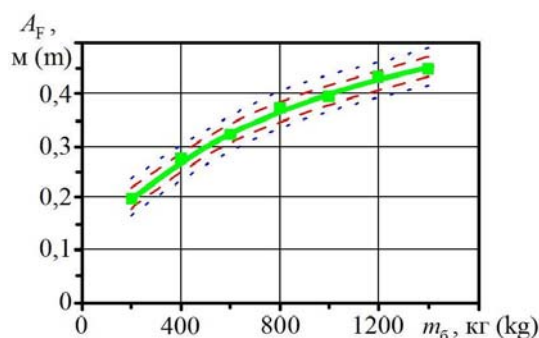
образом, угловая неравномерность показателей кривошипно-коленчатого привода составляет приемлемое значение в пределах 4,6-23,6 %.

В процессе работы гидравлического манипулятора на погрузочно-разгрузочных площадках, масса перемещаемых лесоматериалов может существенно различаться. Для оценки эффективности рециркуляции энергии кривошипным приводом в режимах различной нагрузки выполнена серия компьютерных экспериментов, в процессе осуществления которых изменяли массу груза от 200 до 1400 кг с шагом 200 кг.

Выявлено, что рекуперлируемая энергия возрастает практически линейно с 394 до 2587 Дж с увеличением массы лесоматериалов с 200 до 1400 кг (рис. 10, а). Линейная зависимость, очевидно, связана с линейной зависимостью энергии движущегося тела от массы: $E = mv^2/2$. Амплитуда раскачивания груза увеличивается приблизительно по степенной зависимости вида $A_F = m_b^a$. При увеличении массы груза с 200 до 600 кг амплитуда колебаний груза увеличивается существенно: с 0,2 до 0,33 м.



а



б

Рисунок 10. Зависимость рекуперлируемой энергии E_p и амплитуды раскачивания груза A_F от массы груза m_b

Figure 10. Dependence of the recuperated energy E_p and the amplitude of the swing of the load A_F on the mass of the load m_b

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

При дальнейшем увеличении массы груза с 600 до 1400 кг амплитуда колебаний увеличивается не так быстро: с 0,33 до 0,48 м.

Таким образом, для типичного гидравлического манипулятора с длиной стрелы 6 м при торможении поворота колонны система рекуперации позволяет запасти от 0,39 до 2,59 кВт при массе груза соответственно от 200 до 1400 кг, при приемлемой амплитуде раскачивания пачки бревен соответственно от 0,2 до 0,48 м.

Выводы

Анализ научных работ зарубежных авторов позволил выявить перспективные научные направления исследований, направленных на повышение эффективности работы гидравлических манипуляторов, задействованных в процессе погрузки, разгрузки, а также перемещения различных видов грузов. С целью повышения энергоэффективности, производительности и надежности гидравлических манипуляторов лесовозных автопоездов, авторами была предложена перспективная конструкция гидравлического полноповоротного механизма колонны с кривошипным приводом. Главной особенностью предлагаемого полноповоротного механизма с кривошипным приводом гидравлического манипулятора является возможность преобразования, накопления и полезного использования непроизводительно рассеиваемой кинетической энергии в процессе торможения колонны манипулятора. Эта особенность способствует повышению производительности процесса погрузки и разгрузки лесоматериалов, а также снижению расхода топлива лесовозным автопоездом.

Разработаны математическая модель и компьютерная программа работы гидравлического манипулятора с рекуперативным кривошипным приводом полноповоротного механизма колонны, позволяющие оценить рекуперлируемую энергию и амплитуду раскачивания перемещаемого груза.

Установлено также, что при использовании гидравлического манипулятора, оснащенного предлагаемым кривошипным приводом, длина стрелы которого составляет 6 м, а масса перемещаемых лесоматериалов 600 кг, количество энергии, которое можно накопить в пневмогидравлическом аккумуляторе составляет около 1300 Дж. Такое количество энергии рабочей жидкости позволит гидрав-

лическому манипулятору поднять лесоматериалы массой 600 кг на высоту 22 см.

Учитывая тот факт, что необходимая погруженная высота поднятия стрелы гидравлического манипулятора с грузом составляет порядка 4 м, использование накопленной энергии рабочей жидкости при повороте колонны с грузом позволит сократить энергоемкость операции подъема стрелы на 11 %.

Современные конструкции пневмогидравлических аккумуляторов обладают энергоемкостью до 100 кДж. Это дает возможность накапливать в них энергию рабочей жидкости от порядка 75 циклов поворота механизма колонны с кривошипным приводом, и далее осуществить в режиме полезного использования накопленной энергии не менее 6 подъемов стрелы с грузом массой 600 кг на платформу лесовозного автопоезда.

Для достижения максимального рекуперативного эффекта целесообразно располагать гидроцилиндры кривошипного привода по одну сторону с точкой *C* воздействия гидроцилиндров по отношению к оси *O* вращения колонны.

Угловая неравномерность показателей кривошипного привода составляет 23,6 % и 4,6 % при оценке по показателям рекуперированной энергии и амплитуды раскачивания груза соответственно.

Для типичного гидравлического манипулятора с длиной стрелы 6 м при торможении поворота колонны система рекуперации позволяет запасти от 0,39 до 2,59 кВт при массе груза соответственно от 200 до 1400 кг, при приемлемой амплитуде раскачивания груза соответственно от 0,20 до 0,48 м.

Список литературы

1. Влияние режимов движения лесовозного автопоезда при вывозке лесоматериалов на эффективность рекуперации энергии в пневмогидравлическом седельно-сцепном устройстве / В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, А. С. Чуйков, А. В. Авдюхин // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 4 (48). – С. 114-129. – *Библиогр.*: с. 125–128 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/8>.
2. Посметьев, В. И. О влиянии традиционных конструкций гидроманипуляторов на эффективность лесовозного автомобильного транспорта / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эксплуатации автомобильного транспорта и пути их решения на основе перспективных технологий и научно-технических решений», 2022. – С. 24-31. – *Библиогр.* : с. 30-31 (9 назв.). – DOI: http://doi.org/10.58168/PRTOW2022_24-31
3. Energy efficiency improvement of heavy-load mobile hydraulic manipulator with electronically tunable operating modes / R. Ding, J. Zhang, B. Xu, M. Cheng, M. Pan // Energy Conversion and Management, Vol. 188, 15 May 2019, Pp. 447-461. – *Bibliogr.* : pp. 460-461 (31 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anconman.2019.03.023> (SNIP 2,369)
4. Nurmi J. Global Energy-Optimal Redundancy Resolution of Hydraulic Manipulators : Experimental Results for a Forestry Manipulator / J. Nurmi, J. Mattila // Energies 2017, 10(5), 647. – *Bibliogr.* : pp. 30-31 (44 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/en10050647> – SNIP 1,104
5. Yang X. Neural Adaptive Dynamic Surface Asymptotic Tracking Control of Hydraulic Manipulators With Guaranteed Transient Performance / X. Yang, W. Deng, J. Yao // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2022, pp. 1-11. – *Bibliogr.* : pp. 10-11 (43 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2022.3141463> – SNIP 3,306
6. Renner A. Online payload estimation for hydraulically actuated manipulators / A. Renner, H. Wind, O. Sawodny // Mechatronics, Volume 66, April 2020, 102322. – *Bibliogr.* : pp. 13-14 (51 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102322> – SNIP 3,379
7. Dynamic impact of hydraulic systems using pressure feedback for active damping / M. Cheng, S. Luo, R. Ding, B. Xu, J. Zhang // Applied Mathematical Modelling, Volume 89, Part 1, January 2021, pp. 454-469. – *Bibliogr.* : p. 468-469 (31 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.07.043> – SNIP 1,843

8. Petrovic G. R. Mathematical modelling and virtual decomposition control of heavy-duty parallel-serial hydraulic manipulators / G. R. Petrovic, J. Mattila // *Mechanism and Machine Theory*, Volume 170, April 2022, 104680. – *Bibliogr.* : pp. 28-30 (52 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104680> – SNIP 2,294
9. Global energy efficiency improvement of redundant hydraulic manipulator with dynamic programming / S. Zheng, R. Ding, J. Zhang, B. Xu // *Energy Conversion and Management*, Volume 230, 15 February, 2021, 113762. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113762> – SNIP 2,369
10. Zhang X. Dual extended state observer-based adaptive dynamic surface control for a hydraulic manipulator with actuator dynamics / X. Zhang, G. Shi // *Mechanism and Machine Theory*, Volume 169, March, 2022, 104647. – *Bibliogr.* : (34 titles). – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104647> – SNIP 2,294
11. Han J. Trajectory Tracking Control of a Manipulator Based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System / J. Han, F. Wang, C. Sun // *Applied Sciences*, 2023, 13(2) 1046. – *Bibliogr.* : pp. 12-13 (28 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app13021046> – SNIP 1,026
12. Preliminary Experimental Research on the Influence of Counterbalance Valves on the Operation of a Heavy Hydraulic Manipulator during Long-Range Straight-Line Movement / M. J. Lopatka, P. Krogul, A. Rubiec, M. Przybysz // *Energies*, 2022, 15, 5596. – *Bibliogr.* : pp. 15-17 (41 titles). DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155596> – SNIP 1,104
13. Adaptive Fuzzy Back stepping Sliding Mode Control for a 3-DOF Hydraulic Manipulator with Nonlinear Disturbance Observer for Large Payload Variation / H. V. A. Truong, D. T. Tran, X. D. To, K. K. Ahn, M. Jin // *Applied Sciences*, 2019, 9, 3290. – *Bibliogr.* : pp. 27-29 (52 titles). – DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163290> – SNIP 1,026
14. Jensen K. J. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators / K. J. Jensen, M. K. Ebbesen, M. R. Hansen // *Energies* 2021, 14, 6566. – *Bibliogr.* : pp. 26-27 (29 titles). DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206566> – SNIP 1,104
15. Valve Deadzone/Backlash Compensation for Lifting Motion Control of Hydraulic Manipulators / L. Li, Z. Lin, Y. Jiang, C. Yu, J. Yao // *Machines* 2021, 9, 57. – *Bibliogr.* : pp. 17-18 (29 titles). DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9030057> – SNIP 1,390
16. Xia Y. Motion Control of a Hydraulic Manipulator with Adaptive Nonlinear Model Compensation and Comparative Experiments / Y. Xia, Y. Nie, Z. Chen, L. Lyu, P. Hu // *Machines* 2022, 10, 214. – *Bibliogr.* : pp. 18-19 (34 titles). DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10030214> – SNIP 1,390
17. A Teleoperation Framework Based on Heterogeneous Matching for Hydraulic Manipulator / S. Zhou, C. Shen, S. Zhu, W. Li, Y. Nie, Z. Chen // *Machines* 2022, 10, 536. – *Bibliogr.* : pp. 14-15 (30 titles). DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10070536> – SNIP 1,390
18. Qian J. Static Deformation-Compensation Method Based on Inclination-Sensor Feedback for Large-Scale Manipulators with Hydraulic Actuation / J. Qian, Q. Su, F. Zhang, Y. Ma, Z. Fang, B. Xu // *Processes* 2020, 8, 81. – *Bibliogr.* : pp. 16-18 (49 titles). DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8010081> – SNIP 0,889
19. Перспективная конструкция полноповоротного механизма колонны гидравлического манипулятора лесовозного автомобиля / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, А. А. Михайлов // *Материалы Всероссийской научно-практической конференции Современный лесной комплекс страны : проблемы и тренды развития*. Отв. редактор А. А. Платонов. Воронеж, 2022. – С. 57-61. – *Библиогр.* : с. 60-61 (6 назв.). – DOI: http://doi.org/10.58168/MFCCPTD2022_57-61
20. 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* 392 (2019) 012038, *Forestry* 2019 – Pp. 1-8. – *Bibliogr.* : p. 7-8 (11 titles). – DOI: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012038>

21. Nikonov, V. O. Mathematical model of hydromanipulator of forest vehicle with recuperative hydraulic drive / V. O. Nikonov, V. I. Posmetev, V. V. Posmetev // IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 392 (2019) 012039, Forestry 2019 – Pp. 1-8. – *Bibliogr. : p. 8 (10 titles)*. – DOI: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012039>

References

1. Posmetev V. I., Zelikov V. A., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Chuikov A. S., Avdyuhin A. V. *Vliyanie rejimov dvizheniya lesovoznogo avtopoezda pri vivotke lesomaterialov na effektivnost rekuperacii energii v pnevmogidravlicheskom sedelno-scepnom ustroistve* [Influence of the modes of motion of a logging road train during the hauling of timber on the efficiency of energy recovery in a pneumohydraulic fifth wheel coupling device]. Forestry journal. – 2022. – Vol. 12. – № 4 (48). – pp. 114-129. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/8> (In Russ.).
2. Posmetev V. I., Nikonov V. O. *O vliyani tradicionnih konstrukcii gidromanipulyatorov na effektivnost lesovoznogo avtomobilnogo transporta* [On the influence of traditional designs of hydraulic manipulators on the efficiency of logging road transport]. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems of the operation of road transport and ways to solve them based on advanced technologies and scientific and technical solutions", 2022. – P. 24-31. DOI: http://doi.org/10.58168/PRTOW2022_24-31 (In Russ.).
3. Ding R., Zhang J., Xu B., Cheng M., Pan M. Energy efficiency improvement of heavy-load mobile hydraulic manipulator with electronically tunable operating modes. *Energy Conversion and Management*, Vol. 188, 15 May 2019, Pp. 447-461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anconman.2019.03.023>
4. Nurmi J., Mattila J. Global Energy-Optimal Redundancy Resolution of Hydraulic Manipulators : Experimental Results for a Forestry Manipulator. *Energies* 2017, 10(5), 647. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10050647>
5. Yang X., Deng W., Yao J. Neural Adaptive Dynamic Surface Asymptotic Tracking Control of Hydraulic Manipulators With Guaranteed Transient Performance. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2022, Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2022.3141463>
6. Renner A., Wind H., Sawodny O. Online payload estimation for hydraulically actuated manipulators. *Mechatronics*, Volume 66, April 2020, 102322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2020.102322>
7. Cheng M., Luo S., Ding R., Xu B., Zhang J. Dynamic impact of hydraulic systems using pressure feedback for active damping. *Applied Mathematical Modelling*, Volume 89, Part 1, January 2021, Pp. 454-469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.07.043>
8. Petrovic G. R., Mattila J. Mathematical modelling and virtual decomposition control of heavy-duty parallel-serial hydraulic manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, Volume 170, April 2022, 104680. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104680>
9. Zheng S., Ding R., Zhang J., Xu B. Global energy efficiency improvement of redundant hydraulic manipulator with dynamic programming. *Energy Conversion and Management*, Volume 230, 15 February, 2021, 113762. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113762>
10. Zhang X., Shi G. Dual extended state observer-based adaptive dynamic surface control for a hydraulic manipulator with actuator dynamics. *Mechanism and Machine Theory*, Volume 169, March, 2022, 104647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104647>
11. Han J., Wang F., Sun C. Trajectory Tracking Control of a Manipulator Based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Applied Sciences*, 2023, 13(2) 1046. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13021046>
12. Lopatka M. J., Krogul P., Rubiec A., Przybysz M. Preliminary Experimental Research on the Influence of Counterbalance Valves on the Operation of a Heavy Hydraulic Manipulator during Long-Range Straight-Line Movement. *Energies*, 2022, 15, 5596. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155596>

13. Truong H. V. A., Tran D. T., To X. D., Ahn, M. Jin Adaptive Fuzzy Back stepping Sliding Mode Control for a 3-DOF Hydraulic Manipulator with Nonlinear Disturbance Observer for Large Payload Variation. *Applied Sciences*, 2019, 9, 3290. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163290>
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, 6566. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206566>
15. Li L., Lin Z., Jiang Y., Yu C., Yao J. Valve Deadzone/Backlash Compensation for Lifting Motion Control of Hydraulic Manipulators. *Machines* 2021, 9, 57. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines9030057>
16. Xia Y., Nie Y., Chen Z., Lyu L., Hu P. Motion Control of a Hydraulic Manipulator with Adaptive Nonlinear Model Compensation and Comparative Experiments. *Machines* 2022, 10, 214. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10030214>
17. Zhou S., Shen C., Zhu S., Li W., Nie Y., Chen Z. A Teleoperation Framework Based on Heterogeneous Matching for Hydraulic Manipulator. *Machines* 2022, 10, 536. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10070536>
18. Qian J., Su Q., Zhang F., Ma Y., Fang Z., Xu B. Static Deformation-Compensation Method Based on Inclination-Sensor Feedback for Large-Scale Manipulators with Hydraulic Actuation. *Processes* 2020, 8, 81. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8010081>
19. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Mihailov A. A. *Perspektivnaya konstrukciya polnopovorotnogo mehanizma kolonni gidravlicheskogo manipulyatora lesovoznogo avtomobilya* [Perspective design of the full-rotation mechanism of the column of the hydraulic manipulator of a timber vehicle]. Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference Modern forest complex of the country : problems and development trends. Rep. editor A. A. Platonov. Voronezh, 2022. – P. 57-61. DOI: http://doi.org/10.58168/MFCCPTD2022_57-61 (In Russ.).
20. 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* 392 (2019) 012038, *Forestry* 2019 – Pp. 1-8. DOI: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012038>
21. Nikonov V. O., Posmetev V. I., Posmetev V. V. Mathematical model of hydromanipulator of forest vehicle with recuperative hydraulic drive. *IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science* 392 (2019) 012039, *Forestry* 2019 – Pp. 1-8. DOI: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012039>

Сведения об авторах

Посметьев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

✉ *Никонов Вадим Олегович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: 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, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Колодий Петр Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесохозяйственных дисциплин Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, ул. Мазурова – 59/34, г. Гомель, Республика Беларусь, 246053, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6418-1531>, e-mail: pkolody@mail.ru.

Information about the authors

Posmetev Valerii Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

✉ *Nikonov Vadim Olegovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Posmetev Viktor Valerevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvp@mail.ru.

Zelikov Vladimir Anatolyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Kolodiy Petr Vladimirovich – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Disciplines, Gomel State University named after F. Skorina, st. Mazurova – 59/34, Gomel, Republic of Belarus, 246053, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6418-1531>, e-mail: pkolody@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author


Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10>


УДК 630*31 : 629.11.001



Гидромеханические трансмиссии лесотранспортных машин: технологическая связь с воздействием на почвенно-растительную среду

Павел А. Сокол¹ ✉, pavsokol@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6090-7008>

Александр В. Божко², bozhkosizran@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7822-1952>

Татьяна П. Новикова² ✉, novikova_tp.vglta@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Сергей В. Ребко³, rebko@belstu.by  <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>

¹ФГБОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

³Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

Снижение отрицательного влияния на лесную почвенно-растительную среду колесных движителей двухосных сочлененных лесотранспортных машин наряду с изменением параметров непосредственно движителей может быть эффективно осуществлено перераспределением потока мощности в гидромеханической трансмиссии. В целях обеспечения высоких тяговых показателей, и высокой проходимости через единичные препятствия (корневые системы) в условиях лесосеки необходимо учесть рациональные параметры узлов и агрегатов гидромеханической трансмиссии на основе новых научно-обоснованных технических решений. Обзор конструкций гидромеханических трансмиссий лесотранспортных машин отечественного и зарубежного производства выявил их преимущества и недостатки, влияющие на эффективность применения в условиях лесозаготовки. С первичной транспортировкой деревьев, занимающей значительный объем при лесозаготовках, эффективно справляются лесотранспортные машины с высокой энергонасыщенностью. Использование в составе агрегата гидромеханической трансмиссии перспективной конструкции гидротрансформатора для раздельного привода ведущих мостов колесных сочлененных лесотранспортных машин позволит компенсировать действие внешних сил и реакций на колесный движитель, а также минимизировать явление циркуляции мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность», что будет способствовать увеличению тяговых показателей. Технологическая связь от использования разных конструкций трансмиссий характеризуется умеренной дифференциацией ($p < 0.05$) по критериям воздействия на почвенную среду, основанным на использовании медианного метода в статистическом анализе сходства и различия. Будущие исследования ответят на следующие вопросы: как изменится уровень потерь полезной мощности в гидромеханической трансмиссии колесной лесотранспортной машины, оборудованной новым гидротрансформатором, в условиях постоянно меняющихся внешних воздействий? Как и насколько тесно параметры трансмиссии с новым гидротрансформатором будут влиять на показатели и проходимости лесотранспортной машины с учетом особенностей почвенно-растительной среды?

Ключевые слова: лесотранспортные машины, уплотнение лесной почвы, энергонасыщенность, гидромеханические трансмиссии, движитель, редуктор, циркуляция, мощность.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят доктора технических наук, профессора Кочнева Александра Михайловича за ценные замечания при подготовке научного материала для данной статьи. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Анализ применения гидромеханических трансмиссий в конструкции лесотранспортных машин / П. А. Сокол, А. В. Божко, Т. П. Новикова, С. В. Ребко // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 2 (50). – С. 179–197. – Библиогр.: с. 189–196 (54 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10>.


Поступила 16.05.2023. *Пересмотрена* 23.06.2023. *Принята* 24.06.2023. *Опубликована онлайн* 18.09.2023.

Review

Hydro-mechanical powertrain for timber transport vehicles: technological relationship with the impact on the soil and plant environment

Pavel A. Sokol¹ ✉, pavsokol@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6090-7008>

Alexander V. Bozhko², bozhkosizran@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7822-1952>

Tatyana P. Novikova² ✉, novikova_tp.vglta@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1279-3960>

Siarhei U. Rabko³, rebko@belstu.by  <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>

¹*Military Education Air Force Education and Research Center N.E. Zhukovskiy and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the Russian Federation, Starykh Bolshevikov, 54a, Voronezh, 394064, Russian Federation*

²*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation*

³*Belarusian State Technological University, Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus*

Abstract

Reducing the negative impact on the forest soil and vegetation environment of wheeled propellers of biaxial articulated forest transport vehicles, along with changing the parameters of the propellers themselves, can be effectively carried out by redistributing the power flow in the hydromechanical transmission. In order to ensure high traction performance and cross-country capability through single obstacles (root systems) in the conditions of a cutting area, it is necessary to take into account the rational parameters of the components and assemblies of the hydromechanical transmission based on new scientifically sound technical solutions. A review of the designs of hydromechanical transmissions of domestic and foreign-made forest transport vehicles revealed their advantages and disadvantages that affect the effectiveness of their use in the conditions of forest exploitation. The primary transportation of trees, which occupies a significant volume during logging, is effectively handled by forest transport vehicles with high energy saturation. The use of a promising torque converter design as part of a hydromechanical transmission unit for the separate drive of the drive axles of wheeled articulated timber vehicles will compensate for the effect of external forces and reactions to the wheel mover, as well as minimize the phenomenon of power circulation in a closed loop "wheel mover – bearing surface", which will contribute to an increase in traction performance. The technological relationship from the use of different powertrain designs is characterized by moderate differentiation ($p < 0.05$) according to the criteria of impact on

the soil environment, based on the use of the median method in the statistical analysis of similarities and differences. Future research will answer the following questions: how will the level of loss of useful power in the hydromechanical transmission of a wheeled forest transport vehicle equipped with a new torque converter change in conditions of constantly changing external influences? How and how closely will the transmission parameters with the new torque converter affect the performance and patency of the forest transport vehicle, taking into account the characteristics of the soil and plant environment?

Keywords: *timber transport machines, forest soil compaction, energy saturation, hydromechanical transmissions, mover, reducer, circulation, power.*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: the authors thank professor Alexander M. Kochnev for the advice provided in the preparation of scientific material for this article. The authors thank the reviewers of their contribution to the expert evaluation of the article.

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

For citation: Sokol P. A., Bozhko A. V., Novikova T. P., Rabko S. U. (2023) Analysis of the hydro-mechanical powertrain application in timber transport machines. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 2 (50), pp. 179-197 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/10>.

Received 16.05.2023. **Revised** 23.06.2023. **Accepted** 24.06.2023. **Published online** 18.09.2023.

Введение

В настоящее время актуальной и важной практической задачей в лесном комплексе является обеспечение высокой проходимости и маневренности лесотранспортных машин (ЛТМ) при первичной транспортировке деревьев в условиях переувлажненных и слабонесущих лесных дорог, при наличии естественных препятствий и ограниченного пространства лесосек [27]. В целях повышения энергонасыщенности и эффективности применения колесных сочлененных ЛТМ необходимо, чтобы они обладали высокими техническими характеристиками, которые можно достичь путем внедрения конструктивных технических решений и оптимального распределения работ [48], направленных на совершенствование конструкции трансмиссии и ходовой части, способствующих увеличению тяговых показателей. Под действием внешних факторов и условий нагружения силового агрегата происходит изменение процессов энергопреобразования [49,50] в его рабочем цикле с ростом энергетических потерь и снижением до 20% номинальной

мощности¹⁹ [14,15]. Это необходимо учитывать при расчетах агрегатов трансмиссии, так как при этом происходит рассогласование показателей работы двигателя и агрегатов трансмиссии, ведет к дополнительным потерям мощности и снижению показателя эффективности применения ЛТМ до 40-60% от заявленного заводом-изготовителем. В ЛТМ с механической трансмиссией снижение производительности при выполнении операций технологического цикла будет происходить пропорционального уменьшению мощности силового двигателя. У ЛТМ с гидромеханической трансмиссией производительность может снизиться в 1.5 – 2 раза.

Наряду с этим, не менее важной экологической задачей является снижение негативного воздействия ЛТМ [42] в технологических процессах лесозэксплуатации и получении качественного лесосадовочного материала [51] при последующем лесовосстановлении. В.С. Столбин и С.А. Голякевич (2020) выделяют 9 групп факторов негативного воздействия ЛТМ в зависимости от типа окружаю-

¹⁹ Арав Б.Л. Повышение эффективности колесных и гусеничных машин совершенствованием и стабилизацией характеристик моторно-трансмиссионных установок : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.23. 2005. 428 с.

шей среды, особое внимание уделяя «факторам, влияющим на непосредственное состояние лесных почв» [27]. Е.Д. Сабо и соавторы (2012) различают «физическое (первичное), вторичное, дрящееся в ядре уплотнения до 16 лет, и экологическое» [31] уплотнения лесной почвенной среды [32; 33], измеряемые различными методами [30, 34; 35]. Движение и работа ЛТМ влияет только на показатели первичного уплотнения. И.М. Бартенев и М.В. Драпалюк (2012) определяют пять способов редукции негативного воздействия ЛТМ на лесную почву, в число которых включают «усовершенствование конструкции тракторов и лесосечных машин» [29], в контексте данного обзора сфокусированное на гидромеханических трансмиссиях ЛТМ и циркуляции потока мощности [1] в них.

Совершенствование показателей ЛТМ возможно за счет увеличения их энергонасыщенности, способствующей повышению КПД и производительности. Исходя из этого, как в Российской Федерации (РФ), так и за рубежом, проводятся исследования, направленные на повышение эффективности функционирования гидромеханических передач в гидромеханических трансмиссиях ЛТМ, имеющих как достоинства, так и недостатки. Основным недостатком гидромеханических трансмиссий является сложная конструкция узлов и агрегатов, более низкий, чем у механических трансмиссий, КПД, наличие систем охлаждения и питания, высокая стоимость и сложность при производстве.

Применение в конструкции ЛТМ однопоточной схемы гидромеханической трансмиссии (при последовательном соединении гидротрансформатора с механической коробкой передач) способствует расширению диапазона передаточных чисел [54], дает возможность изменять скорость движения до минимально возможной, а также варьировать тяговое усилие [23,24]. Двухпоточная схема трансмиссии ЛТМ (при параллельном соединении гидротрансформатора и механической коробки передач) способствует увеличению КПД гидромеханической трансмиссии, однако сужает диапазон передаточных чисел.

При увеличении числа ведущих мостов [37-39] у ЛТМ усложняется конструкция трансмиссии

и ходовой части, приводя к повышению металлоемкости и материальных затрат на эксплуатацию [47], а также повышенным среднему и номинальному давлению [53] двигателя ЛТМ на почвенную среду [36; 40], и как следствие, увеличение глубины колеи [45] Также увеличиваются потери полезной мощности [44], которые происходят в зубчатых механических редукторах коробки перемены передач, раздаточной коробки, ведущих мостов, причем к ним добавляются «потери от циркуляции мощности в замкнутом контуре «колесный двигатель – опорная поверхность» [11].

Поэтому целью данного научного обзора является установление возможной технологической связи между работой гидромеханических трансмиссий ЛТМ и влиянием на лесную почвенную среду, поиск новых, научно обоснованных технических решений, направленных на увеличение КПД гидротрансформатора.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Трансмиссии колесных двухосных лесотранспортных машин, имеющие различные конструкции узлов, различные по величине потери полезной мощности, различные способы передачи крутящего момента, в том числе и гидромеханической.

Предмет исследования составили факторы, влияющие на тяговые показатели колесного двигателя ЛТМ, а также особенности конструкции узлов и агрегатов гидромеханической трансмиссии, способствующие потерям полезной мощности.

Сбор данных

Источниками данных для проведения исследования были следующие материалы:

- данные по соотношению различных типов трансмиссий ЛТМ (Кочнев, 2007);
- данные по повреждаемости слабонесущих грунтов лесосек (Жуков, Федоренчик, Гороновский, 2007);
- данные по распределению колесных трелевочных тракторов по типоформам (Кочнев, 2007);
- данные по конструкции гидромеханических трансмиссий колесных ЛТМ (PONSSE, 2019);

- данные по конструкции гидромеханических трансмиссий колесных АТМ (HSM, 2021);

- данные по конструкции гидромеханических трансмиссий ЛТМ (ROTTNE, 2020);

- данные по конструкции гидромеханических трансмиссий ЛТМ (АМКОДОР, 2022);

- данные по конструкции гидромеханических трансмиссий ЛТМ (Кировец, 2021).

Анализ данных

Статистические процедуры сравнения применимости трансмиссий ЛТМ осуществляли как по видам трансмиссий (таблица 1), так и по критериям (номинативные переменные CRT1-CRT7):

CRT1 – степень вероятного влияния на уплотнение почвы в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT2 – степень вероятного сдирания почвенного покрова при маневрировании на лесосеке (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT3 – степень вероятности буксования при маневрировании в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT4 – степень проходимости в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT5 – вероятность возникновения эффекта циркулирования мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность» [11] при движении по лесосеке (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая);

CRT6 – вероятность тяговых потерь в условиях лесосеки (1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая)

CRT7 – уровень затрат на приобретение и эксплуатацию (1 – низкий; 2 – умеренный; 3 – высокий).

Сходство и различие визуализировали кластерной дендрограммой, построение которой осуществляли с помощью макроса «Иерархическая кластеризация» программы SPSS Statistics, версия 25, медианным методом и оцениванием удаления номинативной переменной от центра кластера на основании интервальной меры Минковского 2 степени.

Результаты и обсуждение

Возможная применимость трансмиссий ЛТМ с учетом воздействия на почвенную среду представлена в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Анализ применимости трансмиссий двухосных колесных лесотранспортных машин с учетом воздействия на почвенную среду

Table 1

Analysis of the applicability of powertrain of two-axle wheeled forest transport vehicles taking into account the impact on the soil environment

Тип трансмиссии ЛТМ | FTV-powertrain type	CRT 1	CRT 2	CRT 3	CRT 4	CRT 5	CRT 6	CRT 7
Механическая | Mechanical (M)	3	3	3	1	3	2	1
Гидромеханическая (на основе гидростатического звена) | hydromechanical (based on hydrostatic link) (HStat)	3	3	2	2	3	2	2
Гидромеханическая (на основе гидродинамического звена – гидротрансформатора) однопоточная | hydromechanical (based on a hydrodynamic link – a torque converter) single-flow (HDin1F)	2	2	2	2	2	2	2
Гидромеханическая (на основе гидродинамического звена – гидротрансформатора) двухпоточная | hydromechanical (based on a hydrodynamic link – a torque converter) two-flow (HDin2F)	1	1	1	3	1	2	2
Гибридная (гидро + электро) | hybrid (hydro + electric) (Hybrid)	1	1	1	3	1	3	3

Источник: собственные результаты авторов

Source: author's results

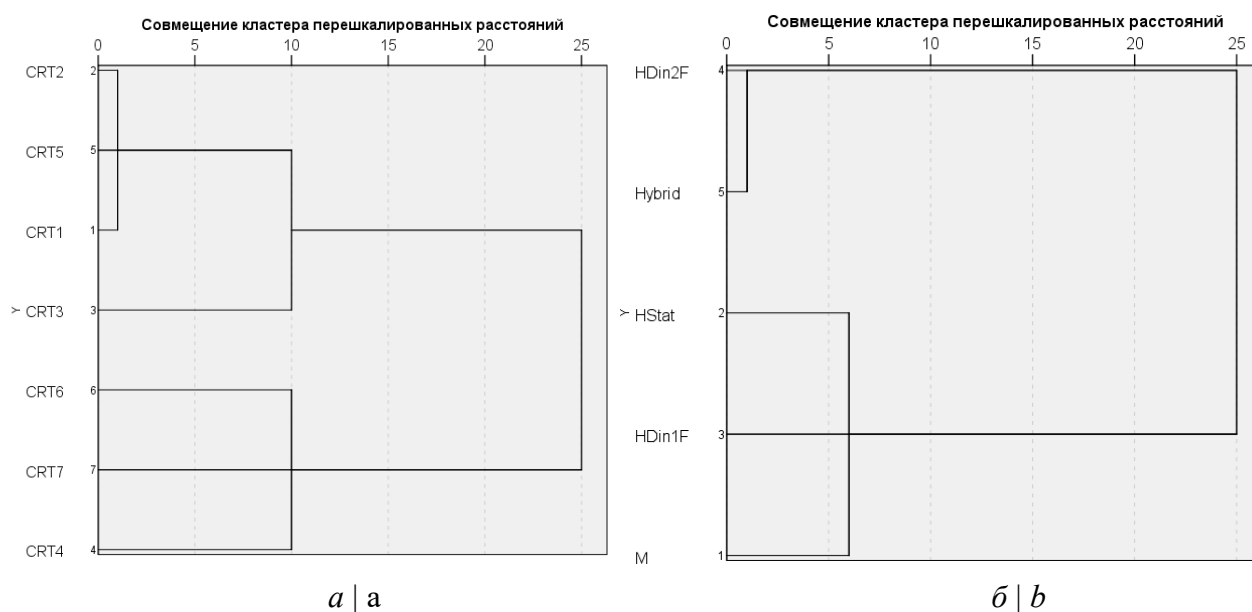


Рисунок 1. Диаграмма сходства и различия для оценки применимости трансмиссий двухосных колесных лесотранспортных машин с учетом воздействия на почвенную среду по критериям CRT1-CRT7 (а) и типам трансмиссии ЛТМ (б)

Figure 1. Diagram of similarities and differences for assessing applicability of powertrain of two-axle wheeled forest transport vehicles taking into account the impact on the soil environment according to classification CRT1-CRT7 criteria (a) and types of FTVs powertrain (b)

Источник: собственные результаты авторов

Source: own results

Анализ конструкций трансмиссий, колесных движителей ЛТМ показал, что конструкторы как в РФ, так и за рубежом [20, 22] идут по пути широкого применения гидромеханических трансмиссий в конструкции ЛТМ, увеличения клиренса для устойчивого движения через корневые системы и пни, а также установки широкопрофильных шин увеличенного диаметра с развитыми грунтозацепами для увеличения площади их контакта с опорной поверхностью (лесной почвой)²⁰²¹²²²³²⁴²⁵²⁶²⁷²⁸²⁹³⁰³¹.

В работе [1] автор указал на характерную особенность работы блокированной механической трансмиссии ЛТМ, когда вследствие кинематического рассогласования ведущих колес, узлы и агрегаты трансмиссии нагружаются дополнительным моментом, и, через ее механизмы передается циркулирующая мощность, достигающая значений 50-60 % от номинальной мощности силового двигателя. Доля ЛТМ с механической трансмиссией составляет 16 %, с гидромеханической трансмиссией 75 %, а с гидрообъемной трансмиссией составляет 9 %. (рис. 2).

²⁰ Ponsse Pic, Ponssentie 22, FL 74200, Viezema, Finland, p.3

²¹ PONSSE. Ponsse Pic, Ponssentie 22, 74200 Viezema, Finland, p.19.

²² PONSSE ELEPHANTKING. PonssePic, Ponssentie 22, 74200, Viezema, Finland, p.5.

²³ PONSSE. An agile and productive Powerhouse. Ponsse Pic, Ponssentie 22, 74200, Viezema, Finland, p.5.

²⁴ PONSSE. A perfect ten for efficiency. Ponsse Gazelle. Ponsse Pic, Ponssentie 22, 74200, Viezema, Finland, p.5

²⁵ PONSSE. The king-size carrier of heavy loads. Ponsse buffaloking. Ponsse Pic, Ponssentie 22, 74200, Viezema, Finland, p.5.

²⁶ PONSSE. Clearly more effective. Beast of burden. Ponsse buffalo. Ponsse Pic, Ponssentie 22, 74200, Viezema, Finland, p.5.

²⁷ HSM 208F12to. HSM Hohenloher Spezial-Maschinenbau. GmbH & Co.KG. ImGreutio, 74635, Neu-Kupfetz, p.2.

²⁸ HSM 208F14to. HSM Hohenloher Spezial-Maschinenbau. GmbH & Co.KG. ImGreutio, 74635, Neu-Kupfetz, p.2.

²⁹ ROTTNE F10 - Rottne Industri AB, Fabnksvagen, 12, 363 30 ROTTNE, Sweden, p.6.

³⁰ ROTTNE F10 - Rottne Industri AB, Fabnksvagen, 12, 363 30 ROTTNE, Sweden, p.6.

³¹ ROTTNE F18 - Rottne Industri AB, Fabnksvagen, 12, 363 30 ROTTNE, Sweden, p.6.

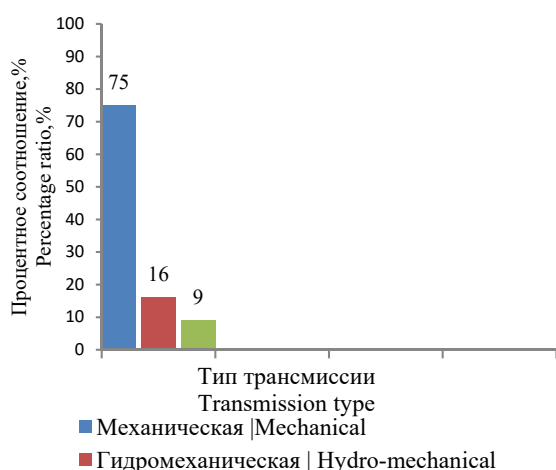


Рисунок 2. Соотношение типов трансмиссий лесотранспортных машин

Figure 2. Ratio of transmission types of forest vehicles
 Источник: Кочнев А.М. Теория движения колесных трелевочных систем. СПб.: Издательство Политехнического университета. - 2007. - 612 с.

Source: Kochnev A.M. Theory of movement of wheeled skidding systems. – St. Petersburg: Publishing House Polytechnic University. – 2007 – p. 612.

Однако увеличение тягового усилия (основного классификационного параметра трактора), принятого в Российской Федерации, приведет, в большинстве случаев, к увеличению массы ЛТМ [3,4,16,25].

На рис. 3 показана степень разрушения верхнего слоя почвогрунтов лесосеки, с разрушением почвенно-растительного слоя (грунт III категории прочности) в летний и осенний периоды тракторами с различным типом движителя³². Автором, в работе³³, указано, что применение в лесном хозяйстве сельскохозяйственных колесных тракторов ограничено из-за их неудовлетворительной проходимости и маневренности в условиях лесосек, а также, специфической компоновки, в отдельных

случаях, препятствующей монтажу технологического оборудования.

Анализ конструкций двухосных колесных ЛТМ отечественных и зарубежных производителей показал, что у них используется шарнирно - сочлененная рама, обеспечивающая малый радиус поворота и повышение проходимости^{34,35,36,37}.

Специальные и универсальные двухосные колесные тракторы, выпускаемые в РФ и используемые как базовая основа для ЛТМ [6], имеют сопоставимые, по сравнению с зарубежными машинами, тяговые свойства, маневренность, проходимость, они дешевле при эксплуатации.

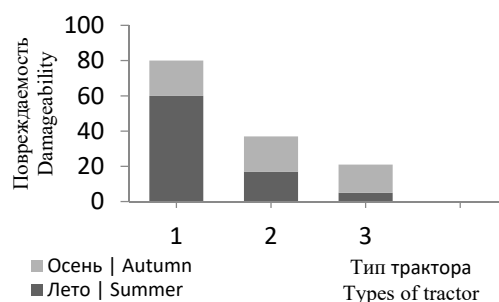


Рисунок 3. Повреждаемость слабонесущих почвогрунтов лесосек

1 – гусеничный трактор; 2 – колесный трактор с надетыми на колеса гусеницами; 3 – колесный трактор с широкопрофильными шинами

Figure 3. Damage to low-bearing soils of cutting areas
 1 – tracked tractor; 2 – wheeled tractor with tracks on wheels; 3 – wheeled tractor with wide-profile tires

Источник: Жуков А.В., Федоренчик А.С., Горонковский А.Р. Совместимость лесных машин со средой МО РБ, БГТУ, Минск, 1999г.

Source: Zhukov A.V., Fedorenchik A.S., Goronovsky A.R. Compatibility of forest machines with the environment. Belarus, BSU, Minsk, 1999.

В трансмиссии таких ЛТМ используется несколько типов коробок переменных передач (КПП): механическая, гидромеханическая, бесступенчатая

³² Жуков, А. В. Совместимость лесных машин со средой : учебное пособие для студ. вузов / А. В. Жуков, А. С. Федоренчик, А. Р. Горонковский. - Минск : БГТУ, 2000. - 48 с.

³³ Исследование компоновки лесных колесных тракторов с шарнирной рамой конструкции ЛТА / Лесные тракторы Т-25 АЛ и Т-40АЛ с колесной формулой 4 x 4 и их модификации: учебное пособие / сост.: С.Ф. Козьмин, М.Я. Дурманов, Г.В. Каршев, С.В. Спиридонов. - СПб.: СПбГЛТА, 2010.- 98 с.

³⁴ Трактор-ревью. Интернет- журнал о сельскохозяйственной спецтехнике. Трактор “Кировец”: модельный ряд. URL : <https://tractorreview.ru/traktory/ptz/traktor-kirovets-modelnyiy-ryad.html>

³⁵ Петербургский тракторный завод. Кировский завод. Каталог. URL : <https://kirovets-ptz.com/catalog/>

³⁶ ТД Кировец. <http://kirovets.ru>

³⁷ Каталог ОАО «АМКОДОР» - управляющая компания холдинга. Продукция. Минск.-2023. <http://amkodor.by>.

(вариатор) [20]. Механические КПП имеют достаточно высокий КПД, но они исключают переключение передач под нагрузкой без разрыва потока мощности.

Обсуждение

Согласно материалам исследования (Бузин Ю.М., 2010)³⁸, для работы любого зубчатого редуктора требуется некоторая мощность, причем, это конкретная величина, а не доля от передаваемой, как считалось ранее. Фактически, потери мощности складываются из некоторой постоянной минимальной величины и переменной части, зависящей от передаваемой мощности. Следовательно, при движении на режимах малой и средней мощности энергетический КПД машины будет низок, а расход горючего повышен. Поэтому, исследования по снижению потерь в зубчатых передачах и оптимизация по количеству ступеней механической трансмиссии являются актуальными.

Еще одним недостатком механических трансмиссий является наличие кинематического дифференциала, когда при изменении числа оборотов ведущих колес, кинематический дифференциал обеспечивает на выходных валах, и, следовательно, у колесного движителя одинаковую величину крутящего момента, что может привести к остановке машины при преодолении повышенных внешних сопротивлений, и, при разном по величине коэффициенте сцепления ведущих колес с ОП.

Бесступенчатые КПП позволяют подобрать оптимальное передаточное отношение при выполнении технологических операций, но они конструктивно сложнее и, при их работе возникают противоречия между режимом, выбранным оператором, и, нагрузке на силовой двигатель рассчитанной бесступенчатой КПП.

Гидромеханическая КПП позволяет переключать передачи под нагрузкой, без разрыва потока мощности, что исключает замедление движения ЛТМ при переключении передач (либо его остановку), а также исключить рывки и перегрузку при увеличении динамической нагрузки.

³⁸ Бузин Ю.М. Механический КПД коробки перемены передач мобильной машины. Теория. 2010: №12. С. 42-45.

В целях повышения тяговых показателей [26], были созданы бесступенчатые трансмиссии (гидрообъемные и электрические), с автоматическим управлением [41] и индивидуальным распределением крутящего момента по ведущим колесам (Курмаев Р.Х., 2003)³⁹, [17-19]. Однако, их основным недостатком является малый КПД из-за двойного преобразования энергии.

В работе Хитрова Е.Г.⁴⁰ [45], а также других авторов [5,6] отмечено, что актуальной задачей для лесопромышленного комплекса является комплектование парка лесосечных машин в соответствии с природно-производственными условиями, необходимость дальнейшего проведения исследований, направленных на совершенствование, конструкция и параметров колесных движителей ЛТМ.

В работах [7,13,21], авторами было отмечено, что ЛТМ для первичной транспортировки деревьев принципиально отличаются от сельскохозяйственных или промышленных тракторов, особенно высокой проходимостью.

В работе [1] автором было указано, что у большинства колесных ЛТМ конструктивно применены гидростатическая или гидродинамическая трансмиссия с возможностью бесступенчатой передачи крутящего момента на ведущие колеса, что уменьшает вероятность возникновения процесса буксования и снижает интенсивность колееобразования.

В работе Трояновской М.П.⁴¹, исследуется процесс поворота колесного двухосного сочлененного трактора, из-за различных внешних нагрузок, действующих сил и реакций, «происходит перераспределение вертикальных и горизонтальных реакций опорной поверхности, действующих на колесный движитель, приводя к изменению динамических радиусов ведущих колес» [12] и «способствуя

³⁹ Курмаев Р.Х. Метод повышения эффективности полноприводной многоосной машины с гидрообъемной трансмиссией за счет использования корректирующих алгоритмов. – Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – 2003. – МГТУ «МАМИ». – 23 с.

⁴⁰ Хитров Е.Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Архангельск, 2020. – 40 с.

⁴¹ Трояновская М.П. Методология моделирования криволинейного движения тракторных агрегатов: автореф. дисс. д-ра техн. наук. – Челябинск : ЮУГУ. – 2004. – 19 с.

возникновению явления циркулирующей мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность» [11].

Также, особенностью двухосных сочлененных колесных ЛТМ, является перераспределение значительных по величине реакции ОП на ведущих колесах, при криволинейном движении и складывании полурам. В результате, происходит изменение величин радиусов ведущих колес, возникновение между ними кинематического рассогласования, приводящего «к возникновению явления циркулирующей мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность» [11].

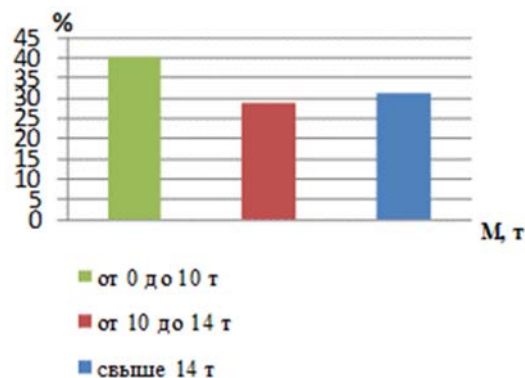
При движении колесной сочлененной ЛТМ возникают продольно-вертикальные и горизонтальные колебания полурам, приводя к значительной разгрузке переднего ведущего моста и возникновению процесса галопирования^{42 43}.

В работе Кочнева А.М.⁴⁴ приведены параметры, наглядно характеризующие технические характеристики колесных трелевочных тракторов, причем, подавляющее большинство (87 %) конструктивно выполнено с гидромеханической трансмиссией (ГМТ) и компоновку по схеме 4К4 (с обоими ведущими мостами). Автор разделил колесные трелевочные тракторы по тяговым классам, указанным на рисунке 4, и, как правило, тракторы легкого класса (28,89 %) имеют механическую трансмиссию, а тракторы среднего (40 %) и тяжелого (31,11 %) классов имеют гидромеханическую трансмиссию. Также автор, на основе накопленного многолетнего опыта по результатам исследования различных моделей ЛТМ, сделал вывод, что трелевку деревьев необходимо выполнять только на специально для этого созданной технике.

⁴² Као Хюи Жап. Обоснование параметров механизма складывания колесных лесных тракторов с целью повышения их маневренности: автореферат дис... кандидата технических наук: 05.21.01 / Као Хюи Жап; [Место защиты: С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С.М. Кирова]. - Санкт-Петербург, 2019. - 19 с.

⁴³ Леденев В.В., Худяков А.В. Основные определения и принципы механики: терминологический словарь. – Тамбов: издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – 2012.- 96С.

⁴⁴ Кочнев А.М. Теория движения колесных трелевочных систем. СПб.: Издательство Политехнического университета. – 2007. – 612С.



M, т – масса трактора

Рисунок 4. Распределение колесных трелевочных тракторов по тяговым классам

Figure 4. Distribution of wheeled skidding tractors by traction classes

Источник: Кочнев А.М. Теория движения колесных трелевочных систем. СПб.: Издательство Политехнического университета. – 2007. – 612С.

Source: Kochnev A.M. Theory of movement of wheeled skidding systems. – St. Petersburg: Publishing House Polytechnic University. – 2007 – p. 612.

При проектировании новой техники требуется как рациональное планирование работ [43, 46], так и корректный подбор коэффициента демпфирования реактивного контура для оказания влияния на амплитуду резонансных колебаний, поскольку при выполнении ЛТМ технологических операций по первичной транспортировке деревьев, под действием подведенного крутящего момента, происходит угловое перемещение входных и выходных валов КПП и РК (Кочнев А.М., 2007). Конструкционные материалы для узлов и агрегатов трансмиссии целесообразно выбирать с учетом величин сил неупругого сопротивления.

В работе [8], авторами было установлено, что при снижении характеристик планетарного ряда двухпоточной гидромеханической передачи происходит увеличение ее КПД. А при повышении характеристик планетарного ряда происходит увеличение коэффициента трансформации. Таким образом, применение двухпоточной гидромеханической передачи в конструкции ЛТМ позволяет переключать передачи под нагрузкой, а также оптимально сочетать внешние нагрузки с крутящим моментом и частотой вращения коленчатого вала силового двигателя.

Основным недостатком существующих дифференциалов планетарного типа является передача повышенной мощности на менее нагруженное колесо (ось), что приводит к быстрому перераспределению мощности между ведущими колесами, что влияет на процесс движения машины вплоть до ее остановки. Поэтому, практическая задача создания дифференциального механизма с сохранением независимого вращения выходных валов и разделительного процесса передачи мощности по ведущим мостам является важной и актуальной. За основу предлагается взять гидротрансформатор с двумя выходными слабосвязанными колесами, что создает два независимых потока мощности с произвольными и независимыми значениями угловой скорости и момента на каждом из выходных валов.

Одним из вариантов решения данной актуальной задачи является оптимальное распределение крутящего момента (рис. 5,6) [9].

В конструкции предлагаемого трансформатора с приводом на два, не связанных между собой выходных вала, применены насосное колесо и два турбинных колеса для независимого привода валов переднего и заднего ведущих мостов, взаимодействующим между собой благодаря потоку жидкости.

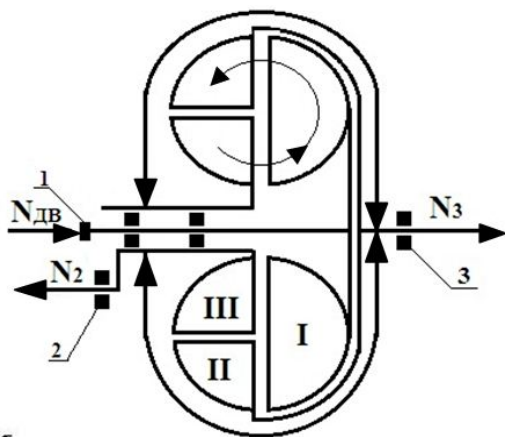


Рисунок 5. Схема гидродинамической передачи для раздельного и независимого привода ведущих мостов

Figure 5. Hydrodynamic transmission scheme for separate and independent drive of drive axles

Источник: Собственная схема авторов [9]

Source: authors' own scheme [9]

Если во время движения ЛТМ один из выходных валов гидродинамической передачи будет заморожен, то второй выходной вал из-за связи через поток жидкости от насосного колеса продолжит вращение.

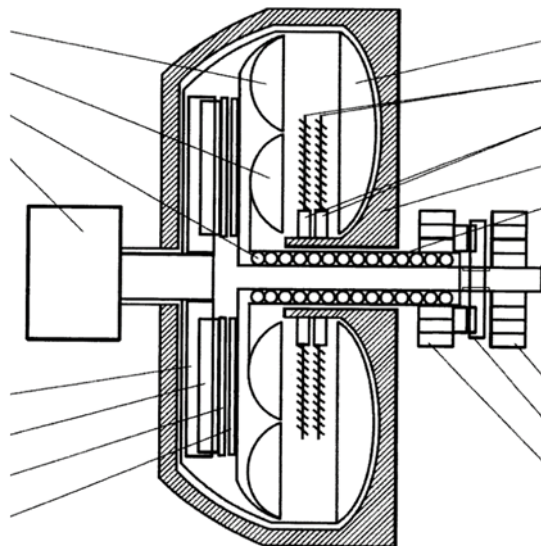


Рисунок 6. Схема гидротрансформатора гидромеханической передачи для раздельного привода ведущих мостов колесного движителя

Figure 6. The scheme of the torque converter of the hydro-mechanical transmission for the separate drive of the wheel drive axles

Источник: Собственная схема авторов [9]

Source: authors' own scheme [9]

Главная особенность и отличие от механической системы состоит в том, что момент на ведущих колесах будет создаваться только из-за циркуляции жидкости, и, будет характеризоваться только параметрами ее движения, и не будет составлять его наименьшую величину, как в механической системе.

В соответствии с целью исследований, в будущем планируется разработать имитационную модель предлагаемого авторами гидротрансформатора, с целью корректного «описания гидравлических и механических процессов, происходящих при работе узлов и агрегатов гидромеханической трансмиссии при взаимодействии колесного движителя и опорной поверхности (почвы)» [12].

Заключение

Для устойчивого развития лесного машиностроения, поддержки предпринимательства в лесном секторе [52] и, следуя политике импортозамещения, необходимо разработать надежные, конкурентоспособные ЛТМ с высокими тяговыми показателями, адаптированные для эксплуатации на слабонесущих грунтах лесосек [3].

Проведенный анализ существующих конструкций гидромеханических трансмиссий колесных двухосных ЛТМ, а также обзор научных исследований позволил установить наиболее существенные факторы, влияющие на их тяговые показатели и показатель эффективности применения. Установлено, что от действия явления циркуляции мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность» теряется до 50 % полезной тяговой мощности.

С целью увеличения силы тяги ведущими колесами и тяговой мощности до 30 % авторами предложена новая перспективная конструкция гидротрансформатора гидродинамической передачи для отдельного и независимого привода ведущих мостов. При этом, мощность силового агрегата до 80 % будет реализована в виде тяговой мощности, а ее потери из-за действия внешних факторов будут составлять до 20 %, способствуя увеличению сменной и годовой производительности до 20 %.

Ее применение будет способствовать снижению потерь тяговой мощности до 20 % путем минимизации действия «явления циркуляции мощности в замкнутом контуре «колесный движитель – опорная поверхность»» [10], и увеличению тяговых показателей ЛТМ до 30%.

Список литературы

1. Сивков, Е. Н. Обоснование параметров колесного трелевочного трактора с целью снижения циркуляции мощности в трансмиссии : дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. – Санкт-Петербург, 2014. – 173 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22348775>.
2. Григорьев, И. В. Состояние и перспективы развития лесного машиностроения в России / И. В. Григорьев, В. А. Кацадзе // Инновации в промышленности и социальной сфере : материалы республиканской научно-практической конференции, Петрозаводск, 16 марта 2015 года / Петрозаводский государственный университет. – Петрозаводск: ООО «Verso», 2015. – С. 27–30. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23256207>.
3. Коршун, В. Н. Гибридная трансмиссия лесохозяйственного трактора / В. Н. Коршун, И. В. Кухар, Д. Е. Шпагин // Машиностроение: новые концепции и технологии : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 23–24 октября 2019 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2019. – С. 198–202. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41493272>.
4. Korshun, V. Energy efficiency in forestry machinery / V. Korshun, I. Kuchar, A. Kamaukhov // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", EastConf 2019, Vladivostok, 01–02 марта 2019 года. – Vladivostok, 2019. – P. 8725311. – DOI 10.1109/Eastconf.2019.8725311.
5. 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>.
6. Двухосные сочлененные лесотранспортные машины в условиях лесосеки: оценка применимости / В. В. Гудков, П. А. Сокол, А. В. Божко [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 4 (48). – С. 77–95. – DOI <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6>. URL: <https://www.elibrary.ru/gqydzw>.
7. Рудов, М. Е. Оценка влияния трелеваемой пачки лесоматериалов на уплотнение лесного почвогрунта: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / М. Е. Рудов. – Петрозаводск, 2015. – 21 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26381861>.

8. К вопросу о выборе параметров двухпоточной гидромеханической передачи для промышленных и лесопромышленных тракторов / В. М. Шарипов, Г. О. Котиев, Ю. С. Щетинин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 3. – С. 8–14. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25675744>.
9. Патент на изобретение № 2788351 РФ, МПКF16H 41/24. Гидротрансформатор гидромеханической передачи для раздельного привода ведущих мостов колесного движителя / В.В. Гудков, А.А. Колтаков, П.А. Сокол, Р.В. Могутнов, А.В. Жердев, А.В. Божко ; заявитель ВУНЦ ВВС "ВВА", Центр ОНР и ПНПК. - № 2022116101 ; заявл. 14.06.2022 ; опубл. 17.01.2023. URL: <https://www.elibrary.ru/vbzdwy>.
10. Гидродинамическая передача раздельного привода ведущих мостов сочлененной лесотранспортной машины / П. А. Сокол, П. И. Попиков, В. В. Гудков, А. В. Божко // Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 25–26 ноября 2021 года / Отв. редактор И.В. Четверикова. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 52-56. – DOI 10.34220/MRTTMFC2021_52-56. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47862482>.
11. Попиков, П. И. Анализ применения балансирного колесного движителя в конструкции дорожных и лесозаготовительных машин / П. И. Попиков, В. В. Гудков, П. А. Сокол // Лесотехнический журнал. – 2018. – Т. 8, № 4 (32). – С. 240–250. – DOI: 10.12737/article_5c1a323cc34ab8.00158395. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47862482>.
12. Бартенев, И. М. Силовое взаимодействие блокированного колесного движителя лесотранспортной машины с опорной поверхностью / И. М. Бартенев, П. И. Попиков, П. А. Сокол // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6, № 4(40). – С. 269–273. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36676651>.
13. Pintsev A., Nakvasina E., Aleynikov A., Tretyakov S., Koptev S., Bogdanov A. Middle-term changes in topsoils properties on skidding trails and cutting strips after long-gradual cutting: a case study in the boreal forest of the North-East of Russia // Croatian Journal of Forest Engineering. – 2018. – Vol. 39. – No 1. – P. 71–83. – DOI: <https://10.5552/crojfe.2018.4189>. – URL: <https://crojfe.com/site/assets/files/4189/ilintsev.pdf>.
14. Fjeld, D. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development - a Norwegian field study / D. Fjeld, Ø. Østby-Berntsen // International Journal of Forest Engineering. – 2020. – Vol. 31. – № 3. – P. 192–196. – DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>.
15. Engler, B. Rubber tracked bogie-axles with supportive rollers - a new undercarriage concept for log extraction on sensitive soils / B. Engler, S. Hoffmann, M. Zscheile // International Journal of Forest Engineering. – 2021. – Vol. 32. – № 1. – P. 43–56. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1834814>.
16. Borz S. A., Marcu M. V., Cataldo M. F. Evaluation of an HSM 208F 14tone HVT-R2 Forwarder prototype under conditions of steep-terrain low-access forests // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. – 2021. – Т. 42. – №. 2. – P. 185–200. <http://dx.doi.org/10.5552/crojfe.2021.775>.
17. Liang H. et al. Research on Torque Optimization Allocation Strategy about Multi-wheel Vehicles // Innovative Techniques and Applications of Modelling, Identification and Control: Selected and Expanded Reports from ICMIC'17. – 2018. – P. 63–92. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-7212-3_5.
18. Leitner S. et al. Tower yarder powertrain performance simulation analysis: electrification study // European Journal of Forest Research. – 2023. – Т. 142. – №. 4. – P. 739–761. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-023-01553-0>.
19. Karlušić J. et al. Benefit assessment of skidder powertrain hybridization utilizing a novel cascade optimization algorithm // Sustainability. – 2020. – Т. 12. – №. 24. – P. 10396. <http://dx.doi.org/10.3390/su122410396>.
20. Woopen T. Adaptive mild hybrid powertrain for four-wheel driven tractors // ATZoffhighway worldwide. – 2017. – Т. 10. – №. 2. – P. 8–13. <http://dx.doi.org/10.1007/s41321-017-0021-8>.
21. Zhu Z. et al. Design and Analysis of a Novel Mechanic-Electronic-Hydraulic Powertrain System for Agriculture Tractors // IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – P. 153811–153823. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2021.3126667>.

22. Bergmann D., Petri S. Holistic control concepts for tractors //ATZoffhighway worldwide. – 2017. – Т. 10. – P. 32-37. <https://doi.org/10.1007/s41321-017-0053-0>.
23. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance //Forests. – 2023. – Т. 14. – №. 1. – Article 103. <http://dx.doi.org/10.3390/f14010103>.
24. LaClair T. J. Application of a tractive energy analysis to quantify the benefits of advanced efficiency technologies for medium-and heavy-duty trucks using characteristic drive cycle data //SAE International Journal of Commercial Vehicles. – 2012. – Т. 5. – №. 2012-01-0361. – P. 141–163. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0361>.
25. Ani O. A. et al. Modeling and multiobjective optimization of traction performance for autonomous wheeled mobile robot in rough terrain //Journal of Zhejiang University SCIENCE C. – 2013. – Т. 14. – №. 1. – С. 11–29. <https://doi.org/10.1631/jzus.C12a0200>.
26. Kim J., Lee J. Traction-energy balancing adaptive control with slip optimization for wheeled robots on rough terrain // Cognitive systems research. – 2018. – Т. 49. – P. 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.01.007>.
27. Mederski P. S. et al. Challenges in forestry and forest engineering–Case studies from four countries in East Europe // Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. – 2021. – Т. 42. – №. 1. – P. 117–134. <http://dx.doi.org/10.5552/crojfe.2021.838>.
28. Столбин, В. С. Анализ научных исследований в области оценки экологического воздействия лесопромышленных машин и технологий на лесные экосистемы / В. С. Столбин, С. А. Голякевич // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2(234). – С. 149–159. – URL: <https://www.elibrary.ru/noyhnm>.
29. Бартнев, И. М. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения / И. М. Бартнев, М. В. Драпалюк // Лесотехнический журнал. – 2012. – № 1(5). – С. 61-66. – URL: <https://www.elibrary.ru/oxdpch>.
30. Захаров, С. Г. Тропа и рекреационная нагрузка: новый метод определения уплотнения почв на тропах / С. Г. Захаров, И. В. Кулик // Географический вестник. – 2017. – № 2(41). – С. 109-117. – DOI 10.17072/2079-7877-2017-2-109-117. – URL: <https://elibrary.ru/ytoqmtю>.
31. Сабо, Е. Д. Виды и динамика уплотнения и разуплотнения почв на вырубках / Е. Д. Сабо, О. В. Кормилицына, В. В. Бондаренко // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2012. – № 3. – С. 42–45. – URL: <https://elibrary.ru/oylawn>.
32. The effects of soil compaction mitigation on below-ground fauna: How earthworms respond to mechanical loosening and power harrow cultivation / K. J. Lees, A. J. McKenzie, J. P. Newell Price et al. // Agriculture, Ecosystems & Environment. – 2016. – Vol. 232. – P. 273–282. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.026>.
33. Acquah, K. Soil Compaction from Wheel Traffic under Three Tillage Systems / K. Acquah, Y. Chen // Agriculture. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 219. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020219>.
34. Impact of MHT9002HV Tracked Harvester on Forest Soil after Logging in Steeply Sloping Terrain / M. Kormanek, J. Dvořák, P. Tylek et al. // Forests. – 2023. – Vol. 14. – № 5. – P. 977. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14050977>.
35. Seasonal changes of perlite–peat substrate properties in seedlings grown in different sized container trays / M. Kormanek, S. Małek, J. Banach et al. // New Forests. – 2020. – № 0123456789. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09793-3>.
36. Kormanek, M. Ground Pressure Changes Caused by MHT 8002HV Crawler Harvester Chassis / M. Kormanek, J. Dvořák // Croatian journal of forest engineering. – 2021. – Vol. 42. – № 2. – P. 201–211. – DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.844>.
37. Kormanek, M. Use of impact penetrometer to determine changes in soil compactness after Entracon Sioux EH30 timber harvesting / M. Kormanek // Croatian journal of forest engineering. – 2022. – Vol. 43. – № 2. – P. 325–337. – DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1054>.

38. Fjeld, D. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development – a Norwegian field study / D. Fjeld, Ø. Østby-Berntsen // *International Journal of Forest Engineering*. – 2020. – Vol. 31. – № 3. – P. 192–196. DOI: <http://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>.
39. Engler, B. Rubber tracked bogie-axles with supportive rollers – a new undercarriage concept for log extraction on sensitive soils / B. Engler, S. Hoffmann, M. Zscheile // *International Journal of Forest Engineering*. – 2021. – Vol. 32. – № 1. – P. 43–56. DOI: <http://doi.org/10.1080/14942119.2021.1834814>.
40. Gelin, O. Concept evaluations of three novel forwarders for gentler forest operations / O. Gelin, R. Björheden // *Journal of Terramechanics*. – 2020. – Vol. 90. – P. 49–57. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.04.002>.
41. 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 10.1088/1755-1315/392/1/012035. – URL: <https://elibrary.ru/ddrbrq>.
42. Reducing the impact of transport machinery and equipment on the environment during reforestation: An innovative approach / M. S. Khripchenko [et al.] // *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference*. – Granada, 2019. – P. 2438–2445. – URL: <https://elibrary.ru/mbfcwn>.
43. Беяева, Т. П. Оптимальное планирование комплексных проектов создания электронной компонентной базы / Т. П. Беяева, А. П. Затворницкий // *Информационные системы и технологии*. – 2013. – № 3(65). – С. 5–10. – URL: <https://elibrary.ru/ntnxin>.
44. Бартенева, И. М. Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин / И. М. Бартенева, Е. В. Поздняков // *Лесотехнический журнал*. – 2013. – № 3(11). – С. 114–123. – URL: <https://elibrary.ru/rqqreb>.
45. Хитров, Е. Г. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах / Е. Г. Хитров, И. М. Бартенева // *Лесотехнический журнал*. – 2016. – Т. 6, № 4(24). – С. 233–239. – DOI 10.12737/23463. – URL: <https://elibrary.ru/xjhjhhv>.
46. Беяева, Т. П. Система управления формированием и реализацией проектов дизайн центра микроэлектроники: дис. ... канд. техн. наук / Т. П. Беяева. – Воронеж, 2012. – 147 с. – URL: <https://www.elibrary.ru/qfmmjj>.
47. 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://www.elibrary.ru/vxxdjz>.
48. 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>.
49. К вопросу развития системы энергообразования двигателей внутреннего сгорания / А. И. Новиков [и др.] // *Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования*. – Воронеж, 2014. – Т. 1. – С. 272–274. – URL: <https://elibrary.ru/slkaqt>.
50. Новиков, А. И. Опыт применения альтернативных источников энергии в транспортно-технологическом комплексе / А. И. Новиков // *Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования*. – 2014. – Т. 1, № 1 (1). – С. 62–65. – URL: <https://elibrary.ru/tjqqlq>.
51. Роль качества лесного репродуктивного материала при лесовосстановлении / В. Иветич [и др.] // *Лесотехнический журнал*. – 2019. – Т. 9, № 2 (34). – С. 56–65. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7. – URL: <https://elibrary.ru/hsenfb>.
52. Формы поддержки развития предпринимательства в лесном секторе ЦЧР / С. С. Морковина, Ю. Г. Денисова, О. И. Драпалюк, Б. Шанянь // *Лесотехнический журнал*. – 2013. – № 4 (12). – С. 210–216. – URL: <https://elibrary.ru/rtvozn>.

53. О сопоставлении среднего и номинального давления движителя лесной машины на почвогрунт / Е. Г. Хитров, Е. В. Котенев, А. В. Андронов [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2019. – № 229. – С. 185–195. – DOI 10.21266/2079-4304.2019.229.185-195. – URL: <https://www.elibrary.ru/qdwnun>.

54. Методика определения оптимальных рабочих передаточных чисел гидромеханической трансмиссии трелевочного трактора / К. Ву Хай, В. Л. Довжик, А. В. Андронов, О. А. Михайлов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2014. – № 208. – С. 73–83. – URL: <https://www.elibrary.ru/thivaj>.

References

1. Sivkov, E. N. Justification of the parameters of a wheeled skidding tractor in order to reduce the power circulation in the transmission : specialty 05.21.01 "Technology and machines of logging and forestry" : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Sivkov Evgeny Nikolaevich. - St. Petersburg, 2014. – 173 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22348775>.

2. Grigoriev, I. V. State and prospects of development of forest engineering in Russia / I. V. Grigoriev, V. A. Katsadze // Innovations in industry and social sphere: Materials of the Republican scientific and practical conference, Petrozavodsk, March 16, 2015 / Petrozavodsk State University. – Petrozavodsk: ООО "Verso", 2015. – pp. 27-30. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23256207>.

3. Korshun, V. N. Hybrid transmission of forestry tractor / V. N. Korshun, I. V. Kukhar, D. E. Shpagin // Mechanical engineering: new concepts and technologies : collection of articles of the All-Russian Scientific and practical Conference of students, postgraduates and young scientists, Krasnoyarsk, October 23-24, 2019. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev", 2019. – pp. 198-202. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41493272>

4. Korshun, V. Energy efficiency in forestry machinery / V. Korshun, I. Kuchar, A. Kamaukhov // 2019 International Science and Technology Conference "EastConf", EastConf 2019, Vladivostok, 01–02 марта 2019 года. – Vladivostok, 2019. – P. 8725311. – DOI 10.1109/Eastonf.2019.8725311.

5. 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>.

6. Biaxial articulated forest transport machines in the conditions of a cutting area: assessment of applicability / V. V. Gudkov, P. A. Sokol, A.V. Bozhko [et al.] // Forestry Journal. – 2022. – Vol. 12, No. 4(48). – pp. 77-95.– DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.4/6.

7. Rudov, M. E. Assessment of the impact of a trellised bundle of timber on the compaction of forest soil : specialty 05.21.01 "Technology and machines of logging and forestry" : abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Rudov Maxim Evgenievich. – Petrozavodsk, 2015. – 21 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26381861>

8. On the question of choosing the parameters of a two-flow hydromechanical transmission for industrial and timber tractors / V. M. Sharipov, G. O. Kotiev, Yu. S. Shchetinin [et al.] // Tractors and agricultural machines. – 2016. – No. 3. – pp. 8-14.– URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25675744>

9. Patent for invention No. 2788351 of the Russian Federation, IPC F16H 41/24. Hydro-mechanical transmission torque converter for separate drive of wheel drive axles / V.V. Gudkov, A.A. Koltakov, P.A. Sokol, R.V. Mogutnov, A.V. Zherdev, A.V. Bozhko ; applicant VUNTS VVS "VVA", Center ONR and PNPК. - No. 2022116101 ; application. 14.06.2022 ; publ. 17.01.2023.

10. Hydrodynamic transmission of a separate drive of the drive axles of an articulated forest transport machine / P. A. Sokol, P. I. Popikov, V. V. Gudkov, A.V. Bozhko // Modern resource-saving technologies and technical means of the forest complex : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, November 25-26, 2021 / Editor-in-chief I.V. Chetverikova. – Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named

after G.F. Morozov, 2021. – pp. 52-56. – DOI 10.34220/MRTTMFC2021_52-56. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47862482>

11. Popikov, P. I. Analysis of the use of a balancing wheel mover in the construction of road and logging machines / P. I. Popikov, V. V. Gudkov, P. A. Sokol // *Forestry Journal*. – 2018. – Vol. 8, No. 4(32). – pp. 240-250. – DOI 10.12737/article_5c1a323cc34ab8.00158395. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47862482>

12. Bartenev, I. M. Force interaction of a blocked wheeled mover of a forest transport vehicle with a support surface / I. M. Bartenev, P. I. Popikov, P. A. Sokol // *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. – 2018. – Vol. 6, No. 4(40). – pp. 269-273. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36676651>

13. Ilintsev A., Nakvasina E., Aleynikov A., Tretyakov S., Koptev S., Bogdanov A. Middle-term changes in topsoils properties on skidding trails and cutting strips after long-gradual cutting: a case study in the boreal forest of the North-East of Russia // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – 2018. – Vol. 39. – No 1. – P. 71-83. – URL: <https://crojfe.com/site/assets/files/4189/ilintsev.pdf>.

14. Fjeld, D. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development - a Norwegian field study / D. Fjeld, Ø. Østby-Berntsen // *International Journal of Forest Engineering*. – 2020. – Vol. 31. – № 3. – P. 192-196. URL: DOI: 10.1080/14942119.2020.1765645

15. Engler, B. Rubber tracked bogie-axles with supportive rollers - a new undercarriage concept for log extraction on sensitive soils / B. Engler, S. Hoffmann, M. Zscheile // *International Journal of Forest Engineering*. – 2021. – Vol. 32. – № 1. – P. 43-56. URL: DOI: 10.1080/14942119.2021.1834814

16. Borz S. A., Marcu M. V., Cataldo M. F. Evaluation of an HSM 208F 14tone HVT-R2 Forwarder prototype under conditions of steep-terrain low-access forests // *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*. – 2021. – T. 42. – № 2. – P. 185-200. <http://dx.doi.org/10.5552/crojfe.2021.775>.

17. Liang H. et al. Research on Torque Optimization Allocation Strategy about Multi-wheel Vehicles // *Innovative Techniques and Applications of Modelling, Identification and Control: Selected and Expanded Reports from ICMIC'17*. – 2018. – P. 63-92. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-7212-3_5.

18. Leitner S. et al. Tower yarder powertrain performance simulation analysis: electrification study // *European Journal of Forest Research*. – 2023. – T. 142. – №. 4. – P. 739-761. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-023-01553-0>.

19. Karlušić J. et al. Benefit assessment of skidder powertrain hybridization utilizing a novel cascade optimization algorithm // *Sustainability*. – 2020. – T. 12. – №. 24. – P. 10396. <http://dx.doi.org/10.3390/su122410396>.

20. Woopen T. Adaptive mild hybrid powertrain for four-wheel driven tractors // *ATZoffhighway worldwide*. – 2017. – T. 10. – №. 2. – P. 8-13. <http://dx.doi.org/10.1007/s41321-017-0021-8>.

21. Zhu Z. et al. Design and Analysis of a Novel Mechanic-Electronic-Hydraulic Powertrain System for Agriculture Tractors // *IEEE Access*. – 2021. – T. 9. – P. 153811-153823. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2021.3126667>.

22. Bergmann D., Petri S. Holistic control concepts for tractors // *ATZoffhighway worldwide*. – 2017. – T. 10. – P. 32-37. <http://dx.doi.org/10.1007/s41321-017-0053-0>.

23. Bumber Z., Đuka A., Pandur Z., Poršinsky T. Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance // *Forests*. – 2023. – T. 14. – №. 1. – Article 103. <http://dx.doi.org/10.3390/f14010103>.

24. LaClair T. J. Application of a tractive energy analysis to quantify the benefits of advanced efficiency technologies for medium-and heavy-duty trucks using characteristic drive cycle data // *SAE International Journal of Commercial Vehicles*. – 2012. – T. 5. – №. 2012-01-0361. – P. 141-163. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0361>.

25. Ani O. A. et al. Modeling and multiobjective optimization of traction performance for autonomous wheeled mobile robot in rough terrain // *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*. – 2013. – T. 14. – №. 1. – C. 11-29. <https://doi.org/10.1631/jzus.C12a0200>.

26. Kim J., Lee J. Traction-energy balancing adaptive control with slip optimization for wheeled robots on rough terrain // *Cognitive systems research*. – 2018. – T. 49. – P. 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.01.007>.

27. Mederski P. S. et al. Challenges in forestry and forest engineering—Case studies from four countries in East Europe // *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*. – 2021. – Т. 42. – № 1. – P. 117-134. <http://dx.doi.org/10.5552/crojfe.2021.838>.
28. Stolbin, V. S. Analysis of scientific research in the field of assessing the environmental impact of forestry machines and technologies on forest ecosystems / V. S. Stolbin, S. A. Golyakevich // *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources*. – 2020. – № 2(234). – P. 149-159. – URL: <https://www.elibrary.ru/noyhnm>.
29. Bartenev, I. M. Reducing the harmful effects of forest tractors and cutting machines on soil and plantings / I. M. Bartenev, M. V. Drapalyuk // *Forestry Engineering Journal*. – 2012. – № 1(5). – P. 61-66. – URL: <https://www.elibrary.ru/oxdpch>.
30. Zakharov, S. G. Trop and recreational Grub: a new method of defining the soil of Trop / s. G. Zakharov, I. V. Kulik // *geographical Journal*. – 2017. – № 2(41). – P. 109-117. – DOI 10.17072/2079-7877-2017-2-109-117. – URL: <https://elibrary.ru/ytqmtro>.
31. Sabo, E. D. Types and dynamics of compaction and decompression of soils in cuttings / E. D. Sabo, O. V. Kormilitsyna, V. V. Bondarenko // *Bulletin of the Moscow State University of the Forest - Forest Bulletin*. – 2012. – No. 3. – P. 42-45. – URL: <https://elibrary.ru/oylawn>.
32. Lees, K.J. The effects of soil compaction mitigation on below-ground fauna: How earthworms respond to mechanical loosening and power harrow cultivation / K.J. Lees, A.J. McKenzie, J.P. Newell Price et al. // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2016. – Vol. 232. – P. 273-282. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.026>.
33. Acquah, K. Soil Compaction from Wheel Traffic under Three Tillage Systems / K. Acquah, Y. Chen // *Agriculture*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 219. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020219>.
34. Kormanek, M. Impact of MHT9002HV Tracked Harvester on Forest Soil after Logging in Steeply Sloping Terrain / M. Kormanek, J. Dvořák, P. Tylek et al. // *Forests*. – 2023. – Vol. 14. – № 5. – P. 977. – DOI: <https://doi.org/10.3390/f14050977>.
35. Kormanek, M. Seasonal changes of perlite–peat substrate properties in seedlings grown in different sized container trays / M. Kormanek, S. Małek, J. Banach et al. // *New Forests*. – 2020. – № 0123456789. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09793-3>.
36. Kormanek, M. Ground Pressure Changes Caused by MHT 8002HV Crawler Harvester Chassis / M. Kormanek, J. Dvořák // *Croatian journal of forest engineering*. – 2021. – Vol. 42. – № 2. – P. 201-211. – DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.844>.
37. Kormanek, M. Use of impact penetrometer to determine changes in soil compactness after Entracon Sioux EH30 timber harvesting / M. Kormanek // *Croatian journal of forest engineering*. – 2022. – Vol. 43. – № 2. – P. 325-337. – DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1054>.
38. Fjeld, D. The effects of an auxiliary axle on forwarder rut development – a Norwegian field study / D. Fjeld, Ø. Østby-Berntsen // *International Journal of Forest Engineering*. – 2020. – Vol. 31. – № 3. – P. 192-196. DOI: <http://doi.org/10.1080/14942119.2020.1765645>.
39. Engler, B. Rubber tracked bogie-axles with supportive rollers – a new undercarriage concept for log extraction on sensitive soils / B. Engler, S. Hoffmann, M. Zscheile // *International Journal of Forest Engineering*. – 2021. – Vol. 32. – № 1. – P. 43-56. DOI: <http://doi.org/10.1080/14942119.2021.1834814>.
40. Gelin, O. Concept evaluations of three novel forwarders for gentler forest operations / O. Gelin, R. Björheden // *Journal of Terramechanics*. – 2020. – Vol. 90. – P. 49-57. – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.04.002>.
41. 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*. – Vol. 392. – P. 012035. – DOI 10.1088/1755-1315/392/1/012035. – URL: <https://elibrary.ru/ddrbrq>.

42. Reducing the impact of transport machinery and equipment on the environment during reforestation: An innovative approach / M. S. Khripchenko, A. I. Novikov, A. Goncharov, E. V. Snyatkov // Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020 : 33, Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020, Granada, 10–11 апреля 2019 года. – Granada, 2019. – P. 2438-2445. – <https://elibrary.ru/mbfawn>.
43. Belyaeva, T. P. Optimal planning of complex projects for the creation of an electronic component base / T. P. Belyaeva, A. P. Zatornitsky // Information systems and technologies. – 2013. – № 3(65). – P. 5-10. – URL: <https://elibrary.ru/ntnxin>.
44. Bartenev, I. M. The wearing capacity of soils and its effect on the durability of the working bodies of tillage machines / I. M. Bartenev, E. V. Pozdnyakov // Forestry Engineering Journal. – 2013. – № 3(11). – P. 114-123. – URL: <https://elibrary.ru/rqqpeb>.
45. Khitrov, E. G. Calculation of the track depth of a wheeled mover of forest tractors on slopes / E. G. Khitrov, I. M. Bartenev // Forestry Engineering Journal. – 2016. – Vol. 6, No. 4(24). – P. 233-239. – DOI 10.12737/23463. – URL: <https://elibrary.ru/xjhjhv>.
46. Belyaeva, T. P. Management system for the formation and implementation of microelectronics design center projects: dis. ... candidate of Technical Sciences. – Voronezh, 2012. – 147 p. – URL: <https://www.elibrary.ru/qfmmjj>.
47. Dorokhin S.V. Mathematical model of the distribution of labor resources in the technical operation and repair of motor vehicles / S.V. Dorokhin [et al.] // Topical issues of innovative development of the transport complex. – Orel, 2016. – pp. 133-139. – URL: <https://www.elibrary.ru/vxxdjz>.
48. Novikov, A. I. Algorithm for solving the problem of optimal distribution of work in network canonical structures / A. I. Novikov [et al.] // Forestry Engineering Journal. – 2014. – Vol. 4, No. 4(16). – P. 309-317. – DOI 10.12737/8515. – URL: <https://elibrary.ru/tondhd>.
49. On the issue of the development of the system of energy formation of internal combustion engines / A. I. Novikov, S. V. Dorokhin, T. P. Novikova, A. G. Kashirskikh // Alternative energy sources in road transport: problems and prospects of rational use. – Voronezh: VGLTU, 2014. – Vol. 1. – P. 272-274. – URL: <https://elibrary.ru/slkaqt>.
50. Novikov, A. I. Experience of using alternative energy sources in the transport and technological complex // Alternative energy sources in the transport and technological complex: problems and prospects of rational use. – 2014. – Vol. 1, No. 1(1). – P. 62-65. – URL: <https://elibrary.ru/tjqql>.
51. Ivetic, V. The role of the quality of forest reproductive material in reforestation / V. Ivetic [et al.] // Forestry Engineering Journal. – 2019. – Vol. 9, No. 2(34). – pp. 56-65. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7. – URL: <https://elibrary.ru/hsenfb>.
52. Forms of support for the development of entrepreneurship in the forest sector of the Central Chernozem region / S. S. Morkovina, Yu. G. Denisova, O. I. Drapalyuk, B. Shan Yang // Forestry engineering journal. – 2013. – No. 4(12). – P. 210-216. URL: <https://elibrary.ru/rtvozn>.
53. On the comparison of the average and nominal pressure of the propeller of a forest machine on the soil / E. G. Khitrov, E. V. Kotenev, A.V. Andronov [et al.] // Izvestia of the St. Petersburg Forestry Academy. - 2019. - No. 229. – pp. 185-195. – DOI 10.21266/2079-4304.2019.229.185-195. – URL: <https://www.elibrary.ru/qdwnun>.
54. Methodology for determining the optimal working gear ratios of the hydraulic transmission of a skidding tractor / K. Wu Hai, V. L. Dovzhik, A.V. Andronov, O. A. Mikhailov // Izvestia of the St. Petersburg Forestry Academy. – 2014. – No. 208. – pp. 73-83. – URL: <https://www.elibrary.ru/thivaj>.

Сведения об авторах

✉ *Павел Александрович Сокол* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автомобильной подготовки ФГКВБОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил Военно-воздушная академия имени Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-6090-7008>, e-mail: pavsokol@yandex.ru.

Александр Владимирович Божко – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7822-1952>, e-mail: bozhkosizran@mail.ru.

✉ *Новикова Татьяна Петровна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

Рибко Сергей Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесных культур и почвоведения, Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь; <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>, e-mail: rebko@belstu.by.

Information about the authors

✉ *Pavel A. Sokol* – PhD (Engineering), Senior Lecturer of Department of Automotive Training, Military Education and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defense of the Russian Federation, Voronezh, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6090-7008>; e-mail: pavsokol@yandex.ru.

Alexandr V. Bozhko – assistants 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, <https://orcid.org/0000-0001-7822-1952>; e-mail: bozhkosizran@mail.ru.

✉ *Tatyana P. Novikova*, Cand. Sci. (Technical), Docent, Chair of Computer Technology and Microelectronic Engineering, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh 394087, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-1279-3960>, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru.

Siarhei U. Rabko – Cand. Sci. (Forestry), Docent, Head of the Department of Forest Crops and Soil Science, Educational Institution "Belarusian State Technological University", Sverdlova str., 13a, Minsk, 220006, Republic of Belarus, <https://orcid.org/0000-0002-6892-2859>, e-mail: rebko@belstu.by.

✉ – Для контактов/Corresponding author

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2023 Том 13 № 2 (50)

Подписано в печать 18.09.2023. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет **XX.XX.2023.** Цена р.

Усл. печ. л. 24,8. Уч.-изд. л. 42,5. 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

2023 Vol. 13 № 2 (50)

Signed to be published 18.09.2023. Format 60×90 1/8.

Publication date **XX.XX.2023.** Price rub.

Cond. print. sh. 24,8. Acc.-print. sh. 42,5. 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

Printed at the Department of Operational Printing
FSBEI HE «VSUFT»

Dokuchaeva str., 10, Voronezh 394087