ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
2021 г. Том 11 № 4 (44)
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., доц. А.И. Новиков

Состав редакционной коллегии
д.б.н., проф. А.А. Сирин (Россия)
д.т.н., проф. Д.Н. Афоничев (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)
д.э.н, проф. С.С. Морковина (Россия)
д-р наук И. Ремеш (Чехия)
д.т.н., проф. А.М. Цыпук (Россия)
д.с.-х.н., проф. М.П. Чернышев (Россия)
д.т.н., проф. О.Н. Бурмистрова (Россия)
д.т.н., проф. И.В. Григорьев (Россия)
д.с.-х.н., проф. К.Н. Кулик (Россия)
д.с.-х.н., проф. А.С. Манаенков (Россия)
д.с.-х.н., проф. А.А. Мартынюк (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.т.н., проф. П.А. Бехта (Украина)
проф. Дингуо Чжоу (Китай)
д-р наук, проф. А. Маркомини (Италия)
д-р наук, проф. В. Подразски (Чехия)
д-р наук, проф. Ф. Ресснер (Германия)
д-р наук, проф. Я. Седлячик (Словакия)
д-р химии Е.А. Чиркова (Латвия)
д-р наук, проф. В. Иветич (Сербия)

Ответственный секретарь
к.э.н., доц. С.В. Харин
Редактор
к.ф.н. Е.А. Прыткова
Компьютерная верстка
к.э.н., доц. С.В. Харин

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

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

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

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

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2021

LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific Journal
2021 Vol. 11 № 4 (44)
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

Chief Editor
Dr., Assoc. prof. A.I. Novikov

Members of editorial board
Dr., prof. A.A. Sirin (Russia)
Dr., prof. D.N. Afonichev (Russia)
Dr., prof. L.I. Belchinskaya (Russia)
Dr., prof. N.N. Matveev (Russia)
Dr., prof. S.M. Matveev (Russia)
Dr., Assoc. Prof. A.A. Gusev (Russia)
Dr., prof. S.S. Morkovina (Russia)
Dr. J. Remes (Czech Republic)
Dr., prof. A.M. Tsypuk (Russia)
Dr., prof. M.P. Chernyshev (Russia)
Dr., prof. O.N. Burmistrova (Russia)
Dr., prof. I.V. Grigoriev (Russia)
Dr., prof. K.N. Kulik (Russia)
Dr., prof. A.S. Manaenkov (Russia)
Dr., prof. A.A. Martynyuk (Russia)
Dr., prof. V.V. Rubtsov (Russia)
Dr., prof. V.S. Syunev (Russia)
Dr., prof. N.N. Kharchenko (Russia)
Dr., prof. P.A. Bekhta (Ukraine)
prof. Zhou Dingguo (China)
Dr., prof. A. Marcomini (Italy)
CSc., prof. V. Podrazsky (Czech Republic)
Dr., prof. F. Roessner (Germany)
Ph.D., prof. J. Sedliacik (Slovakia)
Dr. Chemistry J.A. Chirkova (Latvia)
Dr., prof. V. Ivetić (Serbia)

Executive secretary
PhD in Economics S.V. Kharin
Editor
PhD in Philology E.A. Prytkova
Typesetting
PhD in Economics S.V. Kharin

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

Registration certificate
PI № FS77-66384 of 14.07.2016

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

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», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

Кумицкий Б.М., Евсикова Н.Ю., Тульская С.Г. Дифференциальное моделирование процессов распространения и ликвидации инфекционных заболеваний лесных насаждений 5

Попов О.С., Третьяков С.В., Новоселов А.С. К методике установления интенсивности выделения терпентина при его заготовке в осушаемых сосняках……... 16

ЭКОЛОГИЯ

Дочкина Ю.Н., Корчагин В.И., Плякина А.А. Воздействие абиотических факторов на состояние биоценоза активного ила и его гидробиохимические показатели……. 29

Дочкина Ю.Н., Плякина А.А., Корчагин В.И. Оценка состояния биоценоза активного ила при функционировании в среде с высоким содержанием белково-липидного компонента…… 43

Кабанова С.А., Данченко М.А., Скотт С.А., Кабанов А.Н., Цветкова Н.В., Кириллов В.Ю. Сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в хвое интродуцентов в зеленой зоне г. Нур-Султан…… 57

Крамарева Т.Н., Горбунова Н.С., Куликова Е.В. Миграционные особенности тяжелых металлов в лесных ландшафтах……. 68

ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Снегирева С.Н., Платонов А.Д., Киселева А.В., Кантиева Е.В. Изменчивость твердости древесины сосны, поврежденной сильным низовым и повальным верховым пожаром 79

ТЕХНОЛОГИИ. МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Глушков С.П., Рыбак А.Т., Попиков П.И., Усков В.И., Богданов Д.С., Конюхов А.В. Моделирование рабочих процессов энергосберегающего гидропривода механизма подъема лесного манипулятора……... 88

Демидов Д.Н. Исследование алгоритма оценки параметров предполетной ориентации средств управления беспилотного летательного аппарата при мониторинге молодых лесных насаждений……... 100

CONTENTS

NATURAL SCIENCES AND FOREST

Kumitskiy B.M., Evsikova N.Yu., Tulskaya S.G. Differential modeling of the processes of spreading and elimination of infectious diseases of forest plantations…… 5

Popov O.S., Tretyakov S.V., Novoselov A.S. To the method of establishing the intensity isolation of terpentine during its preparation in dried pine…… 16

ECOLOGY

Dochkina Yu.N., Korchagin V.I., Plyakina A.A. Impact of abiotic factors on the state of activated sludge biocenosis and its hydrobiochemical parameters…… 29

Dochkina Yu.N., Plyakina A.A., Korchagin V.I. Assessment of the state of the activated sludge biocenosis when functioning in an environment with a high content of protein-lipid component…….. 43

Kabanova S.A., Danchenko M.A., Scott S.A., Kabanov A.N., Tsvetkova N.V., Kirillov V.Yu. Comparative analysis of heavy metals accumulation in the needle of introduced species in the green zone of Nur-Sultan…… 57

Kramareva T.N., Gorbunova N.S., Kulikova E.V. Migration features of heavy metals in forest landscapes…… 68

WOOD PROCESSING. CHEMICAL TECHNOLOGY

Snegireva S.N., Platonov A.D., Kiseleva A.V., Kantieva E.V. Variability of the hardness of pine wood damaged by strong grassroots and rampant riding fire…… 79

TECHNOLOGIES. MACHINERY AND EQUIPMENT

Glushkov S.P., Rybak A.T., Popikov P.I., Uskov V.I., Bogdanov D.S., Konyukhov A.V. Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator……. 88

Demidov D.N. Investigation of the algorithm for estimating the parameters of the preflight orientation of the controls of an unmanned aerial vehicle when monitoring young forest stands……. 100

Драпалюк М.В., Стасюк В.В., Зеликов В.А. Новые конструкции универсальных лесопасадочных машин для посадки сеянцев с открытой и закрытой корневой системой… 112

Клубничкин В.Е., Карташов А.Б., Котиев Г.О., Дручинин Д.Ю. Исследование тормозных свойств колесного форвардера 8х8 124

Малюков С.В., Аксенов А.А., Малюкова М.А. Анализ конструкций и режимов работы дисковых рубительных машин 138

Новикова Т.П. Исследование набора технологических операций подготовки семенного материала хвойных пород для лесовосстановления……. 150

Петрищев Е.П. Исследование взаимосвязи биометрических параметров ювенильных сеянцев сосны обыкновенной из кондиционных семян при оценке результатов лесовосстановления…… 161

Подрубалов М.В., Клубничкин Е.Е., Бухтояров Л.Д. Экспериментальные исследования нагруженности трактора на уходе за лесными культурами с разными способами агрегатирования……. 170

Drapalyuk M.V., Stasyuk V.V., Zelikov V.A. New designs of universal planting machines for planting seedlings with open and closed root systems……. 112

Klubnichkin V.E., Kartashov A.V., Kotiev G.O., Druchinin D.Yu. Research of braking properties of wheel forwarder 8×8……. 124

Malyukov S.V., Aksenov A.A., Malyukova M.A. Analysis of designs and operating modes of disc chipping machines……... 138

Novikova T.P. Study of a set of technological operations for the preparation of coniferous seed material for reforestation…… 150

Petrishchev E.P. Investigation of the relationship between biometric parameters of Scots pine juvenile seedlings from conditioned seeds when assessing the results of reforestation…….. 161

Podrubalov M.V., Klubnichkin E.E., Bukhtoyarov L.D. Experimental studies of tractor load during the care of forest plantations using different aggregation methods…… 170

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/1

УДК 630*4

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Борис М. Кумицкий[1] ✉, boris-kum@mail.ru, 0000-0001-8135-8431
Наталья Ю. Евсикова[2], evsikovany_phlt@vgltu.ru, 0000-0001-5288-0140
Светлана Г. Тульская[1], tcdtnkfyf2014@yandex.ru, 0000-0003-4822-4938

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, 394006, Россия*

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

Дестабилизация устойчивого состояния лесов и связанное с ней ухудшение санитарного климата, в основном, связаны с их заболеваниями. Одной из главных задач лесопатологического мониторинга является обнаружение очагов заболевания древостоев и борьба с их распространением. В настоящей работе предложено математическое описание процессов распространения и ликвидации инфекционных заболеваний лесных насаждений с использованием дифференциальной модели SIR (Susceptible, Infected, Recovered), основные положения которой являются базовыми при интерпретации различного рода инфекционных болезней, зачастую принимающих форму эпидемий. В предположении постоянства суммарного числа здоровых инфицированных субъектов в процессе распространения заболевания и прямо пропорциональной зависимости скорости заражения от числа инфицируемых полученные результаты свидетельствуют о том, что: а) если в начальный момент времени число зараженных индивидов не превышает некоторого детерминированного значения, то растения с течением времени не инфицируются; б) если это число больше некоторого фиксированного значения, то восприимчивая к заболеванию часть особей будет заражаться. Показано, что, несмотря на абстрактный характер и невозможность вероятностной интерпретации обнаружения очагов заболевания в силу своей детерминированности, предлагаемая дифференциальная модель может быть эффективна в решении проблем распространения, локализации и прогнозирования заболеваний древостоев и использована практически для любой закрытой биолого-экологической системы.

Ключевые слова: дифференциальная модель, инфекционные заболевания, лесные насаждения.

Благодарности: Авторы статьи благодарят доктора технических наук, профессора кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова Михаила Валентиновича Драпалюка за проявленный интерес к теме исследования и аспиранта кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела ВГТУ Егора Сергеевича Аралова за помощь в оформлении работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Кумицкий, Б. М. Дифференциальное моделирование процессов распространения и ликвидации инфекционных заболеваний лесных насаждений / Б. М. Кумицкий, Н. Ю. Евсикова, С. Г. Тульская // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 5–15. – *Библиогр.: с. 12–15 (21 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/1.

Поступила: 10.11.2021 ***Принята к публикации***: 24.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

DIFFERENTIAL MODELING OF THE PROCESSES OF SPREADING AND ELIMINATION OF INFECTIOUS DISEASES OF FOREST PLANTATIONS

Boris M. Kumitskiy[1], boris-kum@mail.ru, 0000-0001-8135-8431
Natalia Yu. Evsikova[2], evsikovany_phlt@vgltu.ru, 0000-0001-5288-0140
Svetlana G. Tulskaya[1], tcdtnkfyf2014@yandex.ru, 0000-0003-4822-4938

[1] *Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84, Voronezh city, 394006, Russian Federation*
[2] *Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation*

Abstract

The destabilization of the sustainable state of forests and the associated deterioration of the sanitary climate are mainly associated with their diseases. One of the main tasks of forest pathology monitoring is the detection of foci of disease of stands and the fight against their spread. In this paper, we propose a mathematical description of the processes of the spread and elimination of infectious diseases of forest plantations using the deterministic SIR (Susceptible, Infected, Recovered) model, the main provisions of which are basic in the interpretation of various kinds of infectious diseases, often taking the form of epidemics. Assuming the constancy of the total number of healthy infected subjects during the spread of the disease and the direct proportional dependence of the infection rate on the number of infected, the results obtained indicate that: a) if at the initial moment of time the number of infected individuals does not exceed a certain deterministic value, then plants do not become infected over time; b) in cases if this number is greater than a fixed value, then the part of individuals susceptible to the disease will become infected. It is shown that despite the abstract nature and the impossibility of probabilistic interpretation of the detection of foci of the disease, the proposed differential model can be effective in solving the problems of the spread, localization and prediction of tree diseases and is used, practically, for any closed biological and ecological system.

Keywords: differential model, infectious diseases, forest plantations.

Acknowledgments: The authors of the article thank Mikhail Valentinovich Drapalyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design at G.F. Morozov VSTU, for his interest in the proposed study and Egor Sergeevich Aralov, senior lecturer at the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business at VSTU, for his help in the design of the work.

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

***For citation*:** Kumitskiy B.M., Evsikova N.Yu., Tulskaya S.G. (2021) Differential modeling of the processes of spreading and elimination of infectious diseases of forest plantations. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 5-15 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/1.

Received: 10.11.2021 ***Revised***: 02.12.2021 ***Accepted***: 24.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

Известно, что одно из главных богатств страны – лес – не только является легкими нашей планеты, но и служит фундаментальной составляющей продовольственной безопасности, играет важную роль в улучшении комфортности проживания человечества, а также в решении проблемы смягчения последствий изменения климата.

Наблюдаемая в последнее время повсеместная интенсификация лесоразработок сопровождается экологическими проблемами. Одной из них является дестабилизация лесных экологических систем, приводящая к потере биологической устойчивости лесных насаждений [1-3].

К данному моменту на государственном уровне перед лесными организациями нашей страны поставлена задача повышения устойчивости существования лесных насаждений. Основную роль в решении данной проблемы должна осуществлять лесозащита, особенно лесная энтомология [3, 5]. Развитию данного направления в России способствовали труды Г.Ф. Морозова (1867-1920), идеи которого направлены на необходимость изучения болезней лесонасаждений, так как массовые поражения древостоев ведут к нарушению биоценозов [4, 16, 18, 21]. К существующим лесозащитным мероприятиям относятся комплексное применение мониторинга, карантина растений, а также биологического, химического, биофизического и механического методов [8, 12, 17]. Перечисленные мероприятия направлены на сохранение леса как экосистемы и на его защиту от болезней и вредителей.

Для защиты растений непрерывно расширяется производство микробиологических и противовирусных препаратов.

В качестве объекта лесопатологического мониторинга могут служить опасные болезни лесонасаждений, развивающиеся на больших площадях и наносящие лесу существенный урон. Инфекционные (паразитарные) болезни возникают в результате «поселений» болезнетворных организмов на так называемых растениях-хозяевах и получающих от них питание. Далее инфекции легко передаются от заболевших растений к здоровым и поэтому имеют широкое распространение в природе [19, 20]. Среди такого рода распространяющихся инфекций на древостоях 90 % принадлежит грибковым заболеваниям [4, 16].

Изучение механизмов возникновения, развития и распространения инфекционных заболеваний является одним из методов борьбы с ними.

Кроме профилактических мер, разработок, поисков новых лекарственных препаратов и биологических добавок, на борьбу с массовыми заболеваниями растений привлекаются физико-математические методы, позволяющие прогнозировать распространение и локализацию эпидемии [6, 8, 9, 11]. Так, в работе [14] показана эффективность использования математического описания эволюции инфекционных болезней среди полевых растений, различных дифференциальных моделей с привлечением компьютерных исследований.

Однако, несмотря на достаточно сложный математический аппарат, применяемый в представленных моделях, большинство из них носит характер абстракции и слабо связано с реальными моделируемыми объектами. Сведения о моделях, имитирующих развитие инфекционных заболеваний среды древесных насаждений, практически отсутствуют.

Объекты и методы

Целью настоящей работы является применение дифференциальной модели SIR для описания динамики распространения и ликвидации инфекционных заболеваний среди лесных насаждений. Авторами модели SIR являются W.O. Kermack и A.G. McKendrick, которые впервые применили ее для описания эпидемий среди населения в 1927 году [15]. Привлечение данной модели обусловлено универсальностью, позволяющей использовать её и в описании образовательного процесса [7], и при моделировании динамики смены поколений инновационных технологий [11].

Кроме того, достоинством моделей типа SIR, в основе которых лежит аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений, является возможность проведения анализа решений. Рассмотрим данную модель применительно к распространению инфекции среди лесных насаждений. Для этого будем иметь в виду [9], что процесс возникновения и развития инфекции возможен только при сущест-

вовании трех условий: наличия возбудителя болезни, восприимчивости растений и комфортной для развития болезни окружающей среды.

В этой связи экосистему в виде ограниченного лесного массива [14] представим состоящей из трех групп насаждений, каждая из которых с течением времени заболевания изменяет свою численность: $S(t)$, $I(t)$, $R(t)$.

Здесь $S(t)$ – восприимчивая, но ещё не инфицированная группа растений, достаточно слабоустойчивая и легко заражающаяся.

В группу $I(t)$ входят древостои, являющиеся зараженными и носителями какой-либо инфекции. Считаем, что началом развития заболевания является момент появления первых симптомов на растении.

Наконец, третья группа насаждений, численность которой в момент времени t равна $R(t)$, содержит в себе абсолютно здоровые древостои. Следует заметить, что к группе $R(t)$ относятся и растения, выздоровевшие после болезни, хотя практика показывает, что их число небольшое [4]. Выздоровление растений может произойти из-за внезапных изменений условий жизнедеятельности возбудителя заболевания (патогена), а также жизнедеятельности растений (питания) и своевременного проведения оздоровительных мер.

Считается, что в период массового заболевания растений общее число особей в массиве леса остается постоянным (отсутствие гибели растений), т.е.

$$S(t)+I(t)+R(t)=N. \qquad (1)$$

Предположим прямо пропорциональную зависимость скорости изменения числа восприимчивых к заболеванию растений от количества самих восприимчивых индивидов при условии, когда численное значение инфицированных из группы $I(t)$ превышает некоторое фиксированное количество I^*, т. е. когда $I(t) > I^*$. При этом скорость изменения числа зараженных, но уже выздоравливающих особей будем считать пропорциональной числу инфицированных деревьев. Далее считаем, что при $I(t) > I^*$ зараженные особи способны инфицировать восприимчивых к заболеванию растений из окружения S(t). Последнее утверждение содержит в себе факт содержания на карантине или в удалении от восприимчивых к болезни растений [3, 4].

Все сказанное можно описать дифференциальным уравнением

$$\frac{dS}{dt}=\begin{cases}-\alpha S, & если\ I(t)>I^* \\ 0, & если\ I(t)\le I^*\end{cases}. \qquad (2)$$

Так как каждое восприимчивое к болезни растение, заражаясь, само становится носителем инфекции, то скорость образования числа инфицированных особей равна разности в единицу времени между выздоравливающими и вновь заболевшими субъектами [11]

$$\frac{dI}{dt}=\begin{cases}\alpha S-\beta I, & при\ I(t)>I^* \\ -\beta I, & при\ I(t)\le I^*\end{cases}. \qquad (3)$$

Входящие в систему уравнений (3) постоянные α и β будем называть коэффициентами заболевания и выздоровления соответственно, как это было сделано в работе [15], а их отношение $\alpha/\beta=R_0$ – базовым коэффициентом воспроизведения. Для реализации излагаемой математической модели необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\frac{dR}{dt}=\beta I\ . \qquad (4)$$

Однозначное решение уравнений (1) – (4) получим при начальных условиях в предположении, что в момент времени $t = 0$ выбранный для исследования массив заселяют только древостои без иммунитета к инфекции [1], т. е. $R(0) = 0$, а количество инфицированных равно $I(0)$. Далее в предположении равенства коэффициентов α и β ($\alpha = \beta$) рассмотрим два случая развития сценария заболевания.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим случай $I(0)\le I^*$, когда с течением времени лесные насаждения не будут подвержены инфицированию, потому что при этом $dS/dt=0$. Тогда уравнение (1) принимает вид

$$S(t)=S(0)=N-I(0). \qquad (5)$$

Это соответствует ситуации, когда достаточное количество зараженных растений оказывается в карантине (изоляции).

Для этого случая из уравнений (3) следует

$$\frac{dI}{dt} = -\alpha I, \qquad (6)$$

$$I(t) = I(0)e^{-\alpha t}. \qquad (7)$$

С учетом (7) уравнение (1) позволяет найти зависимость от времени эпидемии не подверженной заболеванию группы растений *R(t)*

$$R(t) = N - S(t) - I(t) = I(0)\left[1 - e^{-\alpha t}\right]. \qquad (8)$$

Изменение с течением времени каждой из трех групп, составляющих N насаждений лесного массива в соответствии с уравнениями (5), (7) и (8), показано на рис. 1.

Из рисунка видно, что наблюдается процесс локализации распространения инфекции при неизменном количестве восприимчивых особей.

Для случая, когда $I(0) > I^*$, должен существовать промежуток времени $0 \le t < \tau$, для которого справедливо неравенство $I(t) > I^*$ в предположении непрерывности функции $I(t)$. Это означает, что для всего временного промежутка [*0, τ*) инфекция будет распространяться за счет заражения группы восприимчивых растений в соответствии с уравнением (2), решение которого для всех t из промежутка $0 \le t < \tau$ представляет собой зависимость

$$S(t) = S(0)e^{-\alpha t}. \qquad (9)$$

Подстановка (9) в уравнение (3) дает дифференциальное уравнение

$$\frac{dI}{dt} + \alpha I = \alpha S(e)^{-\alpha t}, \qquad (10)$$

для решения которого умножим обе части его на $e^{\alpha t}$. Получим $d/dt\,(Ie^{\alpha t}) = \alpha S(0)$, откуда

$$Ie^{\alpha t} = \alpha S(0) + c,$$

а множество всех решений уравнения (10) запишется в виде

$$I(t) = ce^{-\alpha t} + \alpha S(0)te^{-\alpha t}. \qquad (11)$$

При начальных условиях $t = 0$ постоянная интегрирования $c = I(0)$, а соотношение (11) примет вид

$$I(t) = \left[I(0) + \alpha S(0)t\right]e^{-\alpha t} \qquad (12)$$

для всех t из интервала $0 \le t < \tau$. Как и в любой задаче о распространении инфекционных заболеваний, главными являются вопросы определения момента времени τ^*, при котором инфицирование восприимчивых к болезням растений прекращается, и значение t^*, когда наступает пик заболеваемости. Это означает, что при $t = \tau^*$ правая часть уравнения (12) становится равной I^*, т. е.

$$I^* = \left[I(0) + \alpha S(0)\tau^*\right]e^{-\alpha\tau^*}. \qquad (13)$$

Считая, что число восприимчивых к болезни насаждений, избегающих заражения, соответствует зависимости

$$S(\tau^*) = \lim_{t\to\tau^*} S(t) = S(0)e^{-\alpha\tau^*}, \qquad (14)$$

можно найти искомый момент времени τ^*

$$\tau^* = \frac{1}{2}\ln\frac{S(0)}{S(\tau^*)}. \qquad (15)$$

Эта формула позволяет прогнозировать время окончания эпидемии, если будет известно число *S(τ*)*. В этом случае, используя (15), из условия (13) получим равенство

$$I^* = \left[I(0) + S(0)\ln\frac{S(0)}{S(\tau^*)}\right]\frac{S(\tau^*)}{S(0)},$$

или (16)

$$\frac{I^*}{S(\tau^*)} + \ln S(\tau^*) = \frac{I(0)}{S(0)} + \ln S(0).$$

Соотношение (16), по существу, представляет собой трансцендентное алгебраическое уравнение с одним неизвестным *S(τ*)*, которое решается графически.

Для определения момента времени максимума числа зараженных индивидов t^* исследуем (12) на экстремум:

$$\frac{dI}{dt} = \left[\alpha S(0) - \alpha I(0) - \alpha^2 S(0)t\right]e^{-\alpha t} = 0.$$

Откуда момент t*, на который приходится пик эпидемии, определяется по формуле

$$t^* = \frac{1}{\alpha}\left[1 - \frac{I(0)}{S(0)}\right]. \qquad (17)$$

Подставляя теперь значение (17) в уравнение (12), получим

$$I_{\max} = S(0)\exp\left[\frac{I(0)}{S(0)} - 1\right] = S(t^*). \qquad (18)$$

Последнее равенство означает, что в момент времени t^* число восприимчивых к заболеванию

растений (S) совпадает с числом зараженных древостоев.

Сравнение выражений (12) и (13) показывает, что при t > t* восприимчивая к заболеванию растительность уже не является заразной, при этом *I(t)* становится равным

$$I(t) = I^* e^{-\alpha(t-t^*)}.$$

Каким образом с течением времени изменяется число представителей каждой из трех рассматриваемых групп растений, схематически представлено на рис. 2.

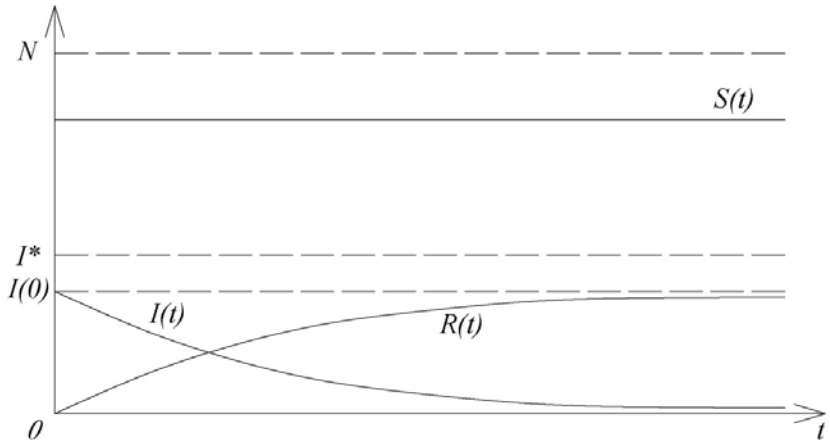


Рисунок 1. Изменение численности отдельных групп насаждений, составляющих лесной массив, в процессе развития эпидемии для случая, когда $I(0) \le I^*$

Figure 1. The change in the number of individual groups of plantings that make up the forest area during the development of the epidemic for the case when $I(0) \le I^*$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

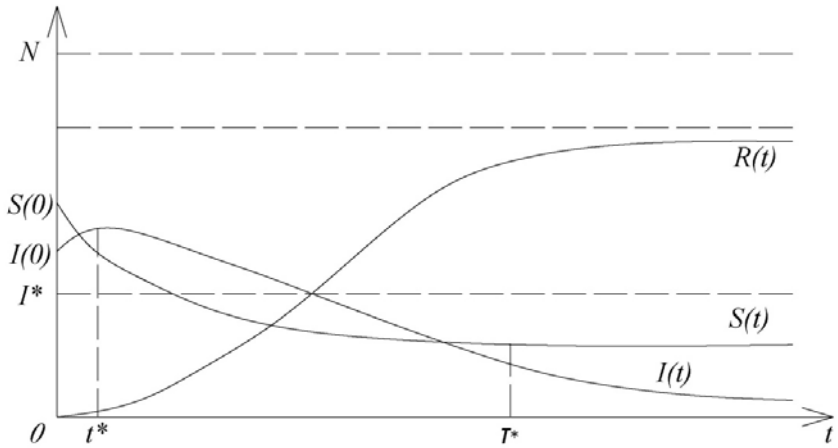


Рисунок 2. Схема изменения численности каждой из трех групп насаждений, составляющих лесной массив, в процессе развития эпидемии для случая $I(0) > I^*$:

t^*- время, соответствующее пику заболевания,

τ^*- момент времени окончания эпидемии

Figure 2. The scheme of changing the number of each of the three groups of plantings that make up the forest area during the development of the epidemic for the case of $I(0) > I^*$:

t^*- the time corresponding to the peak of the disease,

τ^*- the time of the end of the epidemic

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

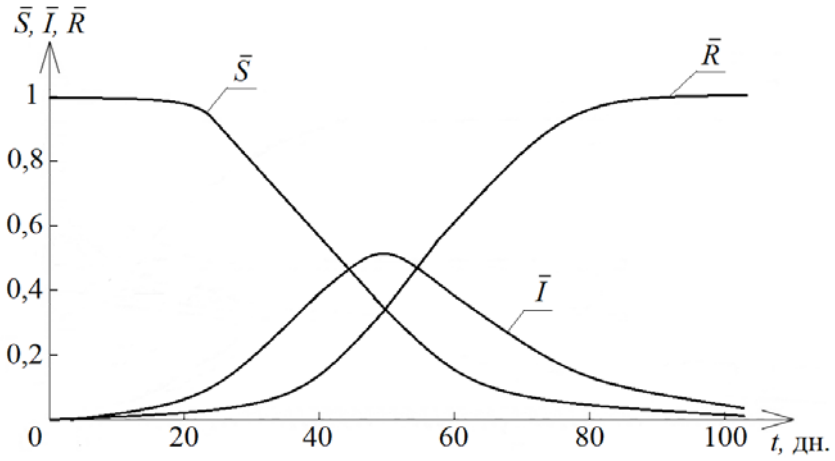


Рисунок 3. Временные зависимости безразмерных компонентов $\bar{S}$, $\bar{I}$, $\bar{R}$ в соответствии с численными решениями (1) – (4) при $R_0 = 4$, $\alpha = 0{,}4$, $\beta = 0{,}1$

Figure 3. Time dependences of dimensionless components $\bar{S}$, $\bar{I}$, $\bar{R}$ in accordance with numerical solutions (1) – (4) at $R_0 = 4$, $\alpha = 0{,}4$, $\beta = 0{,}1$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

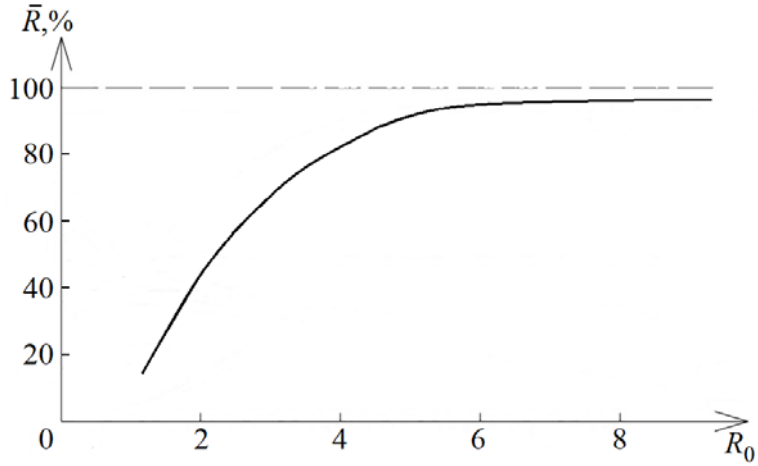


Рисунок 4. Процент переболевших к концу эпидемии лесных насаждений как функция $R_0 = \alpha / \beta$ при $\alpha = 0{,}1$ 1/д и начальных условиях $\bar{S}(0) = 1$, $\bar{R}(0) = 0$, $\bar{I}(0) = 10^{-6}$

Figure 4. The percentage of forest stands that had recovered by the end of the epidemic as a function of $R_0 = \alpha / \beta$ at $\alpha = 0{,}1$ 1/d and initial conditions $\bar{S}(0) = 1$, $\bar{R}(0) = 0$, $\bar{I}(0) = 10^{-6}$

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Видна картина развития и локализации заболевания при неизменной общей численности растений лесного массива в предположении единичного базового коэффициента воспроизведения.

Следует заметить, что представленные на рис. 1 и 2 графические зависимости являются следствием решения системы уравнений (1) – (4) в предположении единичного базового коэффициента ($R_0 = \alpha / \beta = 1$). При этом параметры α и β, имеющие размерности 1/день (1/д), определяют скорости роста числа инфицированных $I(t)$ и выздоравливающих $R(t)$ особей.

Вариации начального числа $I(0)$ зараженных древостоев приводят к изменению времени достижения максимума массового поражения насаждений и окончания процесса распространения заболевания. Численное решение указанной системы уравнений при α = 0,4 1/д и β = 0,1 1/д и начальных условиях $\overline{S}(0)=\frac{S(0)}{N}=1$, $\overline{R}(0)=\frac{R(0)}{N}=0$, $\overline{I}(0)=\frac{I(0)}{N}=10^{-6}$ представлено графически на рис. 3 в относительных составляющих лесного массива. Видно смещение максимума инфекционного заболевания по сравнению с рис. 2 из-за изменения соотношения α и β.

Базисное число R_0 является важным параметром, определяющим характер эпидемии, а также максимальное число инфицированных и переболевших растений к концу эпидемии. Процент лесных насаждений, переболевших и получивших после этого иммунитет, в зависимости от базового коэффициента воспроизведения R_0 показан на рис. 4. При $R_0 < 1$ инфекционное заболевание будет развиваться до формирования иммунитета. При низких значениях коэффициента ($R_0 \approx 1{,}6$) устойчивость к болезни формируется, когда переболеет ~ 20% растений. Этот процент возрастает значительно с увеличением R_0. При $R_0 \approx 6$ количество новых инфицируемых насаждений практически не зависит от параметров α и β.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

Выводы и заключения

1. Показана пригодность использования дифференциальной модели SIR для описания картины развития инфекционных заболеваний среди лесных насаждений.

2. Показано, что для случая незначительного числа инфицированных особей при единичном базовом коэффициенте воспроизведения массового поражения древостоев не наблюдается (эпидемия отсутствует).

3. Для случая большого числа инфицированных растений получены аналитические выражения для определения моментов времени максимальной интенсивности заболевания (пика эпидемии) и локализации последней, что позволяет прогнозировать развитие болезни.

4. Обнаружено совпадение количества восприимчивых к болезни растений с числом инфицированных особей в момент времени, соответствующий максимуму интенсивности заболевания.

5. Для полной реализации предлагаемой математической модели необходимо определить границы численных значений коэффициентов заболеваемости и выздоровления.

Список литературы

1. Антонов О.И., Кузнецов Е.Н. Совершенствование технологии комплексного ухода за лесом с целью повышения качественной продуктивности насаждений. Лесотехнический журнал. 2017: 7;1(25): 42–49. DOI: 12737/25191.

2. Арефьев Ю.Ф. Авторегуляция патогенеза в лесных экосистемах. Лесотехнический журнал. 2018; 8; 3(31): 29–34. DOI: 10.12737/article_5b97a20dd07530.21107185.

3. Арефьев Ю.Ф., Нгуен Тхи Лан Хыонг Принцип экосистемной защиты лесных и полевых насаждений от паразитических организмов. Лесотехнический журнал. 2019: 9;1(33): 17–23. DOI: 10.12737/article_5c92016ba6da97.20256806.

4. Высоцкий А.А., Корчагин О.М. Корневая губка в насаждениях сосны обыкновенной (Pinus sylvestris L.). Проблемы и пути решения. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018;224: 176-192. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=36172850.

5. Карелин Д.В., Замолодчиков Д.Г., Исаев А.С. Малоизвестные импульсные составляющие почвенной эмиссии диоксида углерода в таежных лесах. Доклады академии наук. 2017; 475;4: 473-476. DOI: 10.7868/S0869565217220248.

6. Криворотько О.И., Андорная Д.В., Кабанихин С.И. Анализ чувствительности и практическая идентифицируемость математических моделей биологии. Сибирский журнал индустриальной математики. 2020; 23(1): 107-125. DOI: https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2020.23.110.

7. Кумицкий Б.М., Саврасова Н.А., Плаксина Е.В., Кипрушев А.А. Дифференциальное моделирование эффективности профориентационной работы приемной комиссии вуза. Инженерные системы и технологии. 2020; 1 (38): 42–47.

8. Ухманьски Я.З. Об алгоритмической сущности биологии. Компьютерные исследования и моделирование. 2020; 12;3: 641–652. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-3-641-652.

9. Янчевская Е.Ю., Меснянкина О.А. Математическое моделирование и прогнозирование в эпидемиологии инфекционных заболеваний. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. 2019;23; 3: 328-334. DOI: 10.22363/2313-0245-2019-23-3-328-334.

10. Bergland H., Wyller J., Burlakov E. Pasture-livestock dynamics with density-dependent harvest and changing environment. Natural Resource Modeling. 2019; 32(4): e12213. DOI: https://doi.org/10.1111/nrm.12213.

11. Burlakov E. On Inclusions Arising in Neural Field Modeling. Differential Equations and Dynamical Systems. 2018. 23 pp. DOI: 10.1007/s12591-018-0443-5.

12. Uchmański J., Opaliński K.W., Rau K. Intraspecific competition in an island environment: variability and dispersal of terrestrial snail Helix aspersa aspersa Müller, 1774 (Gastropoda: Helicidae). Acta Zoologica Bulgarica Suppl. 2018; 12: 25-39.

13. Uchmański J. Cyclic outbreaks of forest insects: A two-dimensional individual-based model. Theor Popul Biol. 2019; Aug; 128: 1-18. DOI: 10.1016/j.tpb.2019.04.006. Epub 2019 May 6. PMID: 31071341.

14. Shamilev S.R. Biological, mathematical and computer modeling of a disease of agricultural crops. Economy. Business. Computer science. 2017; 1: 39-54.

15. Kermack W.O., McKendrick A.G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 1927; 115. Iss. 772: 700-721. DOI: https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118.

16. Ghelardini L., Aglietti C., Loria F. (et al.) Dothistroma Needle Blight in protected pine forests in Italy. Manag. Biol. Invasions. 2020; 11. Iss. 4: 689–702. DOI: http://dx.doi.org/10.3391/mbi.2020.11.4.05.

17. Linnakoski R., Forbes K.M. Pathogens – The hidden face of forest invasions by wood-boring insect pests. Frontiers in Plant Science. 2019; 10: 1–5. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00090.

18. Moricca S., Bracalini M., Croci F. (et al.) Biotic factors affecting ecosystem services in urban and peri-urban forests in Italy: The role of introduced and impending pathogens and pests. Forests. 2018.; 9(2): 65. DOI: https://doi.org/10.3390/f9020065.

19. Panzavolta T., Bracalini M., Benigno A., Moricca S. Alien Invasive Pathogens and Pests Harming Trees, Forests, and Plantations: Pathways, Global Consequences and Management. Forests. 2021; 12(10): 1364. DOI: https://doi.org/10.3390/f12101364.

20. Panzavolta T., Panichi A., Bracalini M. (et al.) Tree pathogens and their insect-mediated transport: Implications for oak tree die-off in a natural park area. Global Ecology and Conservation. 2018;15: e00437. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00437.

21. Jactel H., Koricheva J., Castagneyrol B. Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. Current Opinion in Insect Science. 2019;35: 103–108. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010.

References

1. Antonov O. I., Kuznetsov E. N. (2017) Improving the technology of complex care for forests with the aim of improving quality of productivity of plantations. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 7, No. 1 (25), pp. 42-49 (in Russian). DOI: 12737/25191.

2. Arefiev Yu. F. (2018) Authoregulation of pathogenesis in forest ecosystems. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 8, No. 3(31), pp. 29-34 (in Russian). DOI: 10.12737/article_5b97a20dd07530.21107185.

3. Arefiev Yu. F., Nguyen Thi Lan Huong (2019) The principle of ecosystem protection of forest and field plantings from parasitic organisms. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 9, No. 1 (33), pp. 17-23 (in Russian). DOI: 10.12737/article_5c92016ba6da97.20256806.

4. Vysotsky A. A., Korchagin O. M. (2018) Root sponge in Scots pine plantations (Pinus Sylvestris L.). Problems and solutions. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotechnicheskoi akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forestry Academy], No. 224, pp. 176-192 (in Russian). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=36172850.

5. Karelin D. V., Zamolodchikov D. G., Isaev A. S. (2017) Little-known pulse components of soil carbon dioxide emissions in the boreal forests. *Doklady akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], Vol. 475, No. 4, pp. 473-476 (in Russian). DOI: 10.7868/S0869565217220248.

6. Krivorotko O. I., Andornaya D. V., Kabanikhin S. I. (2020) Sensitivity analysis and practical identifiability of mathematical models of biology. *Sibirskij zhurnal industrialnoj matematiki* [Siberian Journal of Industrial Mathematics], Vol. 23, No. 1, pp. 107-125 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2020.23.110.

7. Kumitsky B.M., Savrasova N. A., Plaksina E. V., Kiprushev A. A. (2020) Differential modeling of the effectiveness of career guidance work of the university admissions committee. *Inzhenernye sistemy i tekhnologii* [Engineering systems and technologies], Issue 1 (38), pp. 42-47 (in Russian).

8. Uhmansky Ya.Z. (2020) About the algorithmic essence of biology. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and Modeling], Vol. 12, No. 3, pp. 641-652 (in Russian). DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-3-641-652.

9. Yanchevskaya E. Yu., Mesnyankina O. A. (2019) Mathematical modeling and forecasting in the epidemiology of infectious diseases. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya*: *Medicina* [Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Medicine], Vol. 23. No. 3. pp. 328-334 (in Russian). DOI: 10.22363/2313-0245-2019-23-3-328-334.

10. Bergland H., Wyller J., Burlakov E. Pasture-livestock dynamics with density-dependent harvest and changing environment. Natural Resource Modeling. 2019; 32(4): e12213. DOI: https://doi.org/10.1111/nrm.12213.

11. Burlakov E. On Inclusions Arising in Neural Field Modeling. Differential Equations and Dynamical Systems. 2018. 23 pp. DOI: 10.1007/s12591-018-0443-5.

12. Uchmański J., Opaliński K.W., Rau K. Intraspecific competition in an island environment: variability and dispersal of terrestrial snail Helix aspersa aspersa Müller, 1774 (Gastropoda: Helicidae). Acta Zoologica Bulgarica Suppl. 2018; 12: 25-39.

13. Uchmański J. Cyclic outbreaks of forest insects: A two-dimensional individual-based model. Theor Popul Biol. 2019; Aug; 128: 1-18. DOI: 10.1016/j.tpb.2019.04.006. Epub 2019 May 6. PMID: 31071341.

14. Shamilev S.R. Biological, mathematical and computer modeling of a disease of agricultural crops. Economy. Business. Computer science. 2017; 1: 39-54.

15. Kermack W.O., McKendrick A.G. A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 1927; 115. Iss. 772: 700-721. DOI: https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118.

16. Ghelardini L., Aglietti C., Loria F. (et al.) Dothistroma Needle Blight in protected pine forests in Italy. Manag. Biol. Invasions. 2020; 11. Iss. 4: 689–702. DOI: http://dx.doi.org/10.3391/mbi.2020.11.4.05.

17. Linnakoski R., Forbes K.M. Pathogens – The hidden face of forest invasions by wood-boring insect pests. Frontiers in Plant Science. 2019; 10: 1–5. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00090.

18. Moricca S., Bracalini M., Croci F. (et al.) Biotic factors affecting ecosystem services in urban and peri-urban forests in Italy: The role of introduced and impending pathogens and pests. Forests. 2018.; 9(2): 65. DOI: https://doi.org/10.3390/f9020065.

19. Panzavolta T., Bracalini M., Benigno A., Moricca S. Alien Invasive Pathogens and Pests Harming Trees, Forests, and Plantations: Pathways, Global Consequences and Management. Forests. 2021; 12(10): 1364. DOI: https://doi.org/10.3390/f12101364.

20. Panzavolta T., Panichi A., Bracalini M. (et al.) Tree pathogens and their insect-mediated transport: Implications for oak tree die-off in a natural park area. Global Ecology and Conservation. 2018;15: e00437. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00437.

21. Jactel H., Koricheva J., Castagneyrol B. Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. Current Opinion in Insect Science. 2019;35: 103–108. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010.

Сведения об авторах

Кумицкий Борис Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, Российская Федерация, 394006; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8135-8431, e-mail: boris-kum@mail.ru.

Евсикова Наталья Юрьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5288-0140, e-mail: evsikovany_phlt@vgltu.ru.

Тульская Светлана Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» ул. 20-летия Октября, 84, г. Воронеж, Российская Федерация, 394006; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4822-4938, e-mail: tcdtnkfyf2014@yandex.ru.

Information about the authors

Boris M. Kumitskiy – Cand. Sci. in Physics and Mathematics, associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84, Voronezh city, 394006, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8135-8431, e-mail: boris-kum@mail.ru.

Natalia Yu. Evsikova – Cand. Sci. in Physics and Mathematics, associate Professor, head of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5288-0140, e-mail: evsikovany_phlt@vgltu.ru.

Svetlana G. Tulskaya – Cand. Sci. in Technical Sciences, associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, Voronezh State Technical University, ul. 20-letiya Oktyabrya, 84, Voronezh city, 394006, Russian Federation; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4822-4938, e-mail: tcdtnkfyf2014@yandex.ru.

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/2

УДК 630*4

К МЕТОДИКЕ УСТАНОВЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕРПЕНТИНА ПРИ ЕГО ЗАГОТОВКЕ В ОСУШАЕМЫХ СОСНЯКАХ

Олег С. Попов[1] ✉, popovoleg81@gmail.com, 0000-0003-2464-1729
Сергей В. Третьяков[1], s.v.tretyakov@narfu.ru, 0000-0001-5982-3114
Анатолий С. Новосёлов[2], AnSer-Rock-Bard@mail.ru, 0000-0002-6907-0424

[1]*ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, 163002, Россия*
[2]*ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», ул. Ленина, 15, г. Вологда, 160000, Россия*

В сосновых древостоях, расположенных в Сокольском районе Вологодской области, проведена экспериментальная (опытная) подсочка открытого типа. Объекты исследования представлены насаждениями, расположенными на участках, пройденных в 1972 году гидротехнической мелиорацией, а также аналогичными лесами после проходных рубок ухода. Доминирующая порода в древесном ярусе – сосна, доля ели и березы не достигает 10 %. Выделение терпентина изучали в сосняках на мезотрофной торфяной залежи. Подсочку проводили восходящим способом нанесения подновок. Основное внимание было уделено усовершенствованию методики определения смолопродуктивности сосны обыкновенной. В ходе исследования решены следующие задачи: 1) заложены четыре постоянные пробные площади в осушаемых сосновых насаждениях, кроме того, на двух участках выполнены проходные рубки ухода; 2) в целях исследования на каждой пробной площади проведена опытная двусторонняя заготовка соснового терпентина; 3) определено влияние гидротехнической мелиорации и проходной рубки ухода на количество выделяемого соснового терпентина; 4) разработаны уточняющие коэффициенты для математического расчёта (прогноза) выхода терпентина с нагрузкой ствола каррами в 50 %. По результатам проведённого исследования предложен ряд поправочных коэффициентов для определения смолопродуктивности сосен при учёте их таксационного диаметра, так как математический расчёт выхода терпентина при нагрузке ствола каррами в 50 % зачастую завышается. Подтверждено положительное влияние гидротехнической мелиорации на увеличение диаметра сосны на высоте груди. В осушаемом сосняке после лесоводственного ухода средний выход сосновой живицы выше на ≈22 % относительно древостоя без проведенного лесоводственного ухода.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, заготовка соснового терпентина, смолопродуктивность, гидротехническая мелиорация, проходные рубки ухода

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Попов О. С. К методике установления интенсивности выделения терпентина при его заготовке в осушаемых сосняках / О. С. Попов, С. В. Третьяков, А. С. Новосёлов // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 16–28. – *Библиогр.: с. 26–27 (12 назв.).* – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/2.

Поступила: 01.10.2021 ***Принята к публикации***: 10.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

TO THE METHOD OF ESTABLISHING THE INTENSITY ISOLATION OF TERPENTINE DURING ITS PREPARATIONIN DRIED PINE

Oleg S. Popov[1] ✉, popovoleg81@gmail.com, 0000-0003-2464-1729
Sergey V. Tretyakov[1], s.v.tretyakov@narfu.ru, 0000-0001-5982-3114
Anatoly S. Novoselov[2], AnSer-Rock-Bard@mail.ru, 0000-0002-6907-0424

[1]*FSAEI HE Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation*
[2] *FSBEI HE Vologda State University, 160000, 15 Lenina street, Vologda, Russian Federation*

Abstract

An experimental open-type tapping was carried out in pine stands located in the Sokolsky district of the Vologda region. The objects of study are represented by plantations located on the sites, passed in 1972 by hydrotechnical reclamation, as well as similar forests after continuous thinning. The dominant species in the tree layer is pine, the share of spruce and birch does not reach 10%. The release of turpentine was studied in pine forests on a mesotrophic peat deposit. The tapping was carried out using the ascending method of applying the substrates. The main attention was paid to improving the method for determining the resin productivity of Scots pine. In the course of the study, the following tasks were solved: 1) four permanent test plots were laid in drained pine plantations, in addition, continuous thinning was performed on two sites; 2) for research purposes, an experimental double-sided harvesting of pine turpentine was carried out on each trial plot; 3) the influence of hydrotechnical reclamation and thinning on the amount of released pine turpentine has been determined; 4) specifying coefficients have been developed for the mathematical calculation (forecast) of turpentine yield with a 50% trunk load with tapping cuts. Based on the results of the study, a number of correction factors have been proposed to determine the resin productivity of pines, taking into account their taxation diameter, since the mathematical calculation of the turpentine yield under a trunk load with tapping cuts of 50% carr is often overestimated. The positive effect of hydrotechnical reclamation on the increase in the breast height diameter of pine was confirmed. The average yield of pine resin is about 22% higher, relative to the stand without silvicultural care, in a drained pine forest after silvicultural maintenance.

Keywords: Scotch pine, harvesting of pine turpentine, resin productivity, hydrotechnical reclamation, continuous thinning

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

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

***For citation*:** Popov O.S., Tretyakov S.V., Novoselov A.S. (2021) Methodology of establishing the intensity exudation of turpentine in the drained pine forests. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 16-28 (in Russian). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/2

Received: 01.10.2021 ***Revised***: 29.11.2021 ***Accepted***: 10.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

Общий гидролесомелиоративный фонд сосновых насаждений в России составляет 857,4 тыс. га, или 45 % от общего количества осушаемых земель. Смолопродуктивность на таких участках зависит от целого ряда факторов, таких как тип леса, класс бонитета, возраст, диаметр, полнота, а также промежутка времени, прошедшего после проведения осушительных мероприятий [1]. Чем лучше лесорастительные условия сосняков, выше бонитет и плодороднее почва, тем выше их смолопродуктивность [5].

Ввиду того, что спрос на хвойный терпентин сохраняется и рассматриваемый научный вопрос в настоящее время практически не изучается, тема исследования требует дополнительной проработки. Также при аналогичных природных зонах отсутствуют научные результаты на такой категории земель.

Ранее проведёнными исследованиями [2, 3, 6] установлено, что в сосняках, растущих в заболоченных условиях, наблюдается низкая смолопродуктивность. Проведение лесоосушительных мероприятий улучшает лесорастительные условия древостоев, значительно повышая их производительность и смолопродуктивность [5].

Результаты анализа влияния периода времени, прошедшего после проведения гидролесомелиоративных работ, на заболоченных территориях показывают, что в древостоях на низинных и переходных торфяных почвах, осушаемых в возрасте 20–80 лет, средний бонитет повышается с V – Va до II – III класса, в случае проведения гидротехнических мелиораций при возрасте деревьев от 120 до 150 лет бонитет увеличивается лишь до IV класса [3].

Традиционная лесосырьевая база для заготовки соснового терпентина практически полностью истощена по причине недостаточной доли участия сосны в породном составе лесов. В связи с этим актуально изучение осушаемых сосновых древостоев, пригодных для добычи живицы [2, 6, 11].

Существуют различные методики оценки выхода соснового терпентина. Официально определение смолопродуктивности в сосняках проводится по методу, приведенному в ОСТ 13-80-79 [4]. В настоящее время подсочка древостоев нисходящим способом нанесения технологических резов практически отсутствует. Проведенные наблюдения показывают, что по истечении трёхлетнего периода отмечается заметное снижение выделения живицы деревьями сосны обыкновенной и подсочка становится нерентабельной. При этом в зависимости от способа и срока подсочки, а также типа используемого стимулятора, эта величина изменяется [12].

Исследователи в области прижизненного лесопользования внесли уточняющие коррективы в существующие методики. При нахождении объёма среднего дерева (в том числе методом математического моделирования) можно определить смолопродуктивность [2]. Также следует отметить правки в данную методику в виде увеличения шага подновки до 15 мм, удлинения паузы вздымки до пятидневного срока, а ширину карры рекомендуется принять равной среднему диаметру импактных деревьев и считать такую смолопродуктивность за «нормальную» [10].

Цель исследования – уточнить методику определения смолопродуктивности осушаемых сосняков на торфяных почвах при заготовке терпентина двусторонней подсочкой сосны обыкновенной открытого типа, а также влияние проходных рубок ухода в осушаемых насаждениях на выход живицы.

Для достижения цели были сформулированы следующие ***задачи:***

1. Заложить четыре постоянные пробные площади (ППП) в осушаемых сосновых насаждениях, на двух из которых выполнены проходные рубки ухода;
2. На каждом участке провести опытную двустороннюю подсочку сосны обыкновенной открытого типа;
3. Определить влияние осушительной мелиорации и проходной рубки ухода в осушаемых насаждениях на выделение соснового терпентина при подсочке;
4. Разработать уточняющие коэффициенты для математического расчёта (прогноза) выхода терпентина с нагрузкой ствола каррами в 50 %.

Материалы и методы

В Сокольском районе Вологодской области (в квартале 114) в пределах осушенной части Рабангско-Доровского болотного массива были изучены сосновые насаждения. Гидролесомелиоративный стационар характеризуется торфяными почвами с переходным типом заболачивания. Глубина залегания торфа варьирует от 0,5 до 1,4 м. Доминирующая порода в древесном ярусе представлена сосной обыкновенной. Доля ели и берёзы в общем составе не превышает 10 %. Древесный подрост состоит преимущественно из ели с

одиночными экземплярами сосны; в подлеске в наибольшей степени распространена крушина, а также отмечены можжевельник и рябина.

Исследование проводилось на постоянных пробных площадях, которые закладывались вдоль осушителей, согласно рекомендациям В.Г. Рубцова [7]. Две ППП заложены в приканальном (ПК) и две в центре осушаемого пространства (между каналами – МК). Такое расположение необходимо для установления среднего выхода сосновой живицы на всем межканальном пространстве в обоих вариантах (рис. 1).

ППП номер 4 и 5 были заложены на участках, пройденных проходными рубками ухода. Рубки ухода запроектированы при участии сотрудников ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства». ППП номер 8 и 9 заложены в осушаемой части соснового массива (рис. 2).

В опыте было задействовано 120 импактных сосновых деревьев. Закладка пробных площадей и их лесоводственно-таксационная оценка проводилась согласно общепринятой методике с использованием действующих таксационных нормативов [7, 8, 9].

Удаление грубой корки на каррах (подрумянивание) осуществлялось двуручным стругом на высоте груди. Опытная подсочка проводилась с двух сторон стволов деревьев восходящим способом односторонней каррой с шириной, шагом и углом поднятия регулярных подновок – 10 см, 12,4 мм и 45° соответственно (карродециметр [4]). С обратной стороны ствола наносились подновки на 50 % подрумяненной окружности. С помощью картонного трафарета и аналогичными параметрами подсочки сбор живицы выполнялся в полиэтиленовые приёмники путём их установки в нижней части желобка по методу «в щап». Для проведения желобка, первых «усов» и регулярных подновок использовались желобковый и универсальный хаки. В конце вздымки выполнялось подерёвное взвешивание накопившейся живицы на технических электронных весах CAS SW–05 с точностью взвешивания один грамм.

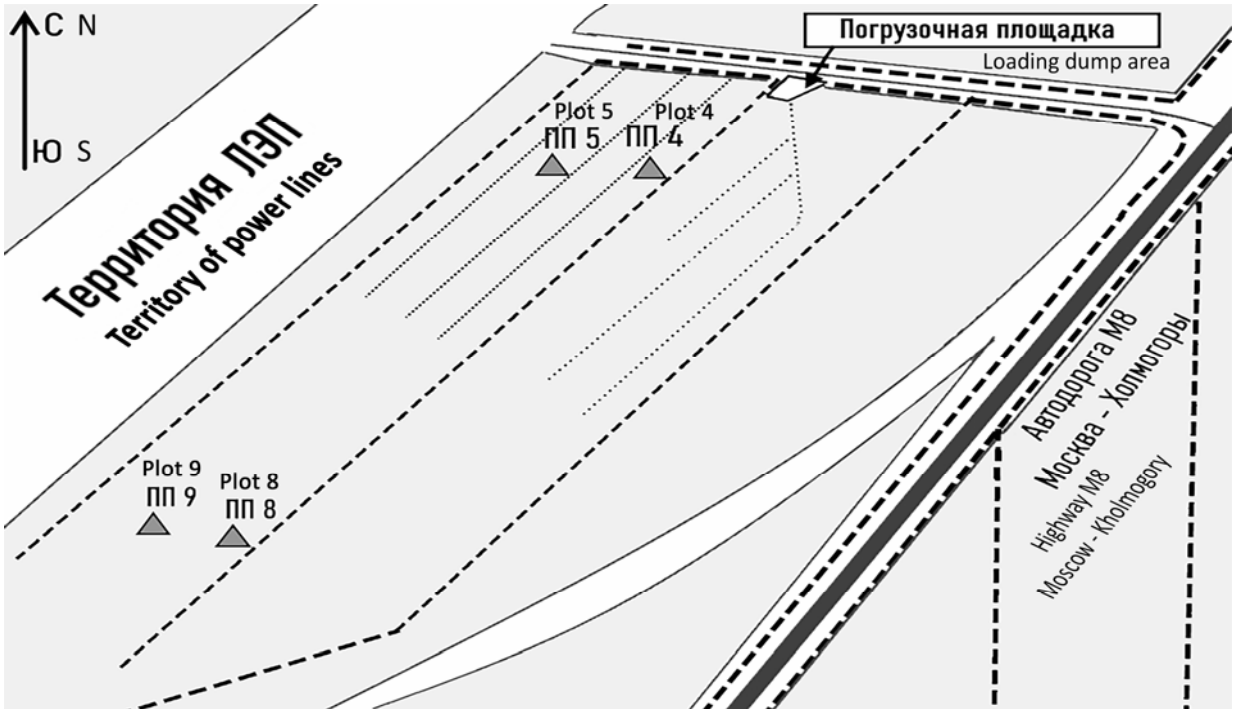
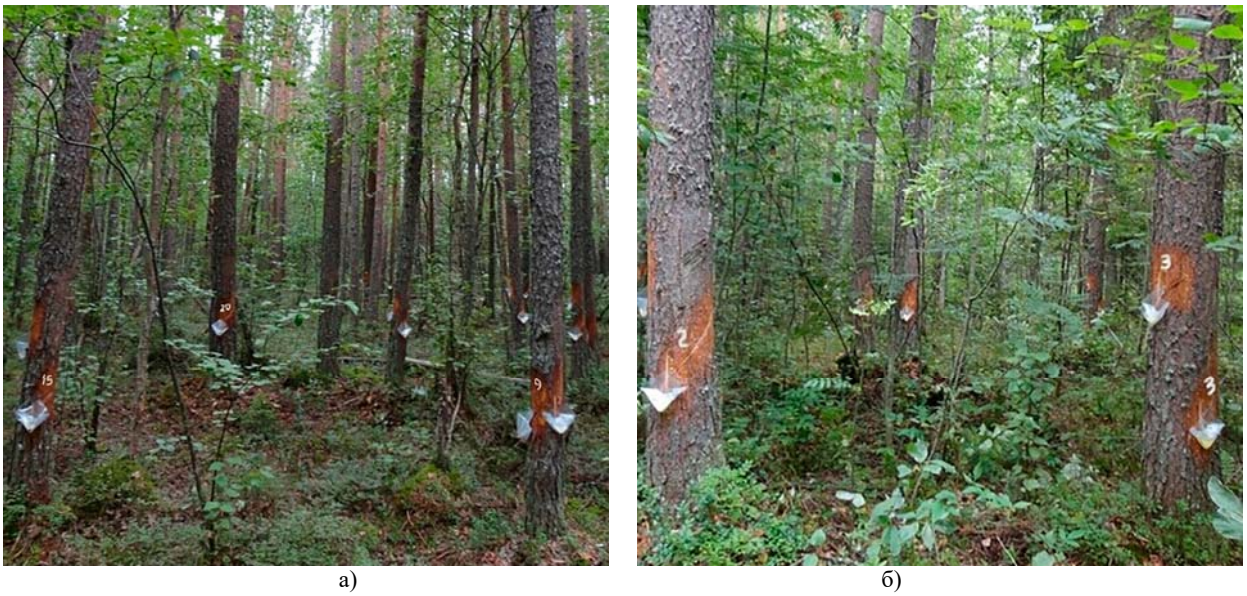


Рисунок 1. Схема расположения опытных древостоев в Сокольском районе Вологодской области

Figure 1. Experimental tree stands in the Sokolsky district of the Vologda region

Источник: собственная разработка авторов

Source: author's composition



а) б)

Рисунок 2. Импактные древостои во время проведения опытной заготовки терпентина: осушаемый сосняк (а) и насаждение после лесоводственного ухода (проходная рубка) (б)

Figure 2. Type of object during exudation of turpentine: the drained pine forest (a) and the forest area during thinning (b)

Источник: собственные фотографии авторов

Source: author's photographs

Таблица 1

Ширина опытной карры при варьировании таксационного диаметра деревьев

Table 1

The width of the test carr with varying taxation diameter of trees

Таксационный диаметр дерева в коре, см | Taxation diameter of the tree in the bark, sm	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Ширина опытной карры, см | Experimental resin groove width, sm	31,4	33,0	34,5	36,1	37,7	39,3	40,8	42,4	44,0	45,5	47,1	48,7	50,2

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Разметка мест нанесения подновок после подрумянивания осуществлялась с разлиновкой через каждый сантиметр по расчёту (табл. 1). Камеральная обработка полученных данных проводилась с помощью программного пакета MS Excel версии 2110 (сборка 14527.20276). Использовался встроенный пакет «Анализ данных» («Описательная статистика» и «Корреляция») с применением критерия Фишера для регрессии при установлении статистической надёжности (уровень – 0,05). Отличие применяемой методики от стандартной заключается в том, что регулярные подновки наносились восходящим способом (с нанесением желобка, рис. 3).

Смолопродуктивность оценивалась по выходу терпентина с карродециметроподновки (КДП). Для этого использовалась градация смолопродуктивности для сосняков на торфяных почвах (на основе работ В. И. Суханова [2], Лесотаксационный справочник…, 1986), предложенная А. Л. Федяевым [3]. Смолопродуктивность: *очень низкая* – 0,0…3,0; *низкая* – 3,1…6,0; *средняя* – 6,1…9,0; *высокая* – 9,1…12,0; *очень высокая* – 12,1 гр./КДП и выше. Три срединные категории в классификации для сосняков Европейского Севера выделил В. И. Суханов. Кроме вышеуказанного, проведённое исследование обусловлено необходимостью учёта таксационного диаметра при определении смолопродуктивности сосняков, произрастающих на торфяных почвах после осушительной мелиорации.

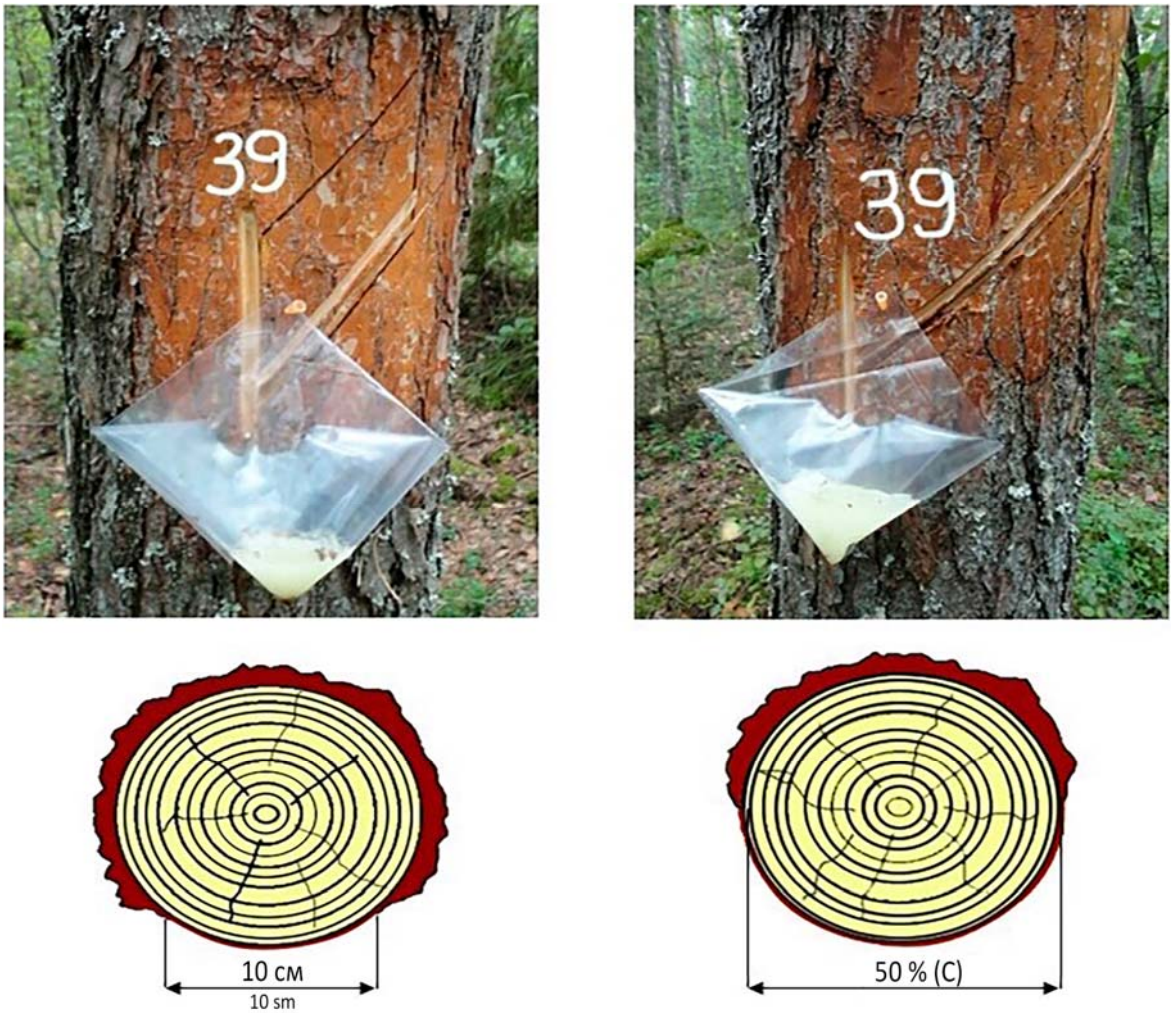


Рисунок 3. Схемы подготовки деревьев и выполнения приёмов подсочки по двум вариантам на одном стволе импактного дерева: при дециметровой карре (с лицевой стороны) (а); с нанесением подновок при технологической нагрузке 50 % (с обратной стороны ствола) (б)

Figure 3. Example of preparing trees and performing tapping techniques according to two options on one trunk of an im-pact tree: with a decimeter carr (from the front side) (a); with padding at a technological load of 50% (from the back of the barrel) (b)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Результаты и обсуждение

Полученные таксационные показатели древостоев (табл. 2) свидетельствуют о положительном влиянии лесоводственных уходов совместно с эффектом от гидротехнической мелиорации на средний диаметр опытных деревьев. Средний общий бонитет для древостоев – третий.

В табл. 2 средний возраст и другие показатели в 4–10 столбцах приведены по сосне. Густота древостоев выше в объектах без заготовки древесины на 46 %. В центре осушаемого пространства густота больше относительно приканального (на 14 % для древостоев, пройденных проходной рубкой ухода, и 25 % для участков без рубки). Запас древостоя на 29 % выше в осушаемых сосняках без проведения ухода. На всех ППП в центре осушаемого пространства сухостоя на 5 % больше относительно приканального положения (от общего запаса). В целом количество сухостойных деревьев незначительно.

По результатам сравнительного анализа количества выделяемого соснового терпентина нужно отметить, что математический перерасчёт живицы, полученной с карродециметроподновки, в её вес при нагрузке ствола в 50 % в большинстве случаев завышает результат, полученный опытным путём.

Таблица 2

Таксационная характеристика объектов исследования

Table 2

Taxation characteristics of research objects

Номер ППП, местоположение | Number PPP, position	Шифр типа леса | Forest type cipher	Состав насаждения | Stand composition	Средний возраст, лет | Average age, years	Средняя высота, м | Average height, m	Средний диаметр, см | Average diameter, sm	Густота, экз./га | Density, copy/ha	Абсолютная полнота, м²/га | Absolute completeness, m²/ha	Относительная полнота | Relative completeness	Запас сырорастущего леса, м³/га | Raw forest reserve, m³/ha
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4, ПК | Close to canal	С. чер.-зм. ос. | green moss, myrtillus type pine forest, drained	10С, ед. Е, Б | 10 Pines, singly spruce, birch	112,2 ± 5,21	21,0 ± 0,74	23,4 ± 0,58	776	35,2	0,9	348
5, МК | Between canals	С. бр.-зм. ос. | green moss, vaccinium type pine forest, drained	9С1Е, ед. Б | 9 Pines, 1 spruce, singly birch	112,4 ± 5,39	20,0 ± 0,59	22,3 ± 0,73	898	35,0	0,9	318
8, ПК | Close to canal	С. бр.-зм. ос. | green moss, vaccinium type pine forest, drained	10С | 10 Pines	112,0 ± 4,95	20,5 ± 0,56	21,3 ± 0,51	1337	50,4	1,3	473
9, МК | Between canals	С. бр.-зм. ос. | green moss, vaccinium type pine forest, drained	10С | 10 Pines	100,8 ± 5,73	19,0 ± 0,39	18,7 ± 0,49	1780	52,7	1,5	465

Примечание: * – ± m_M (ошибка среднего значения)

Note: * – ± m_M (mean error)

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 3

Поправочные коэффициенты к расчёту интенсивности выделения терпентина

Table 3

Correction coefficients for calculation for exudation of turpentine rate

Диметр на 1,3 м | Diameter at 1,3 m	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Коэффициенты (после осушения) | Coefficients (after reclamation)	0,62	0,52	0,46	0,59	0,55	0,53	0,38	0,42	0,45	0,36	0,38	0,39	0,41
Коэффициенты (осушение + уход) | Coefficients (after reclamation + thinning)	0,87	0,74	0,61	0,55	0,52	0,50	0,62	0,51	0,60	0,42	0,38	0,50	0,61

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 4

Перерасчёт полученного с дециметровой карры терпентина на его вес при нагрузке стволов в 50 %

Table 4

Recalculation of turpentine obtained from a decimeter carr by weight with a trunk load of 50%

Тип лесного объекта | Type of forest object	Средний диаметр на высоте груди, см | Average diameter at breast height, sm	Средний вес терпентина с дециметровой карры, гр. | Average weight of turpentine per decimeter resin groove, gm.	Коэффициент изменчивости, % | Coefficient of variation, %	Индивидуальный максимум, гр. | Individual maximum, gm.	Средний вес выделившегося терпентина с карры при нагрузке в 50 %, гр. | Average weight of turpentine released from resin groove, with a trunk load of 50 %	Коэффициент изменчивости, % | Coefficient of variation, %	Индивидуальный максимум, гр. | Individual maximum, gm.
Осушаемый сосняк после проходной рубки ухода	26,3 ± 0,64	113,8 ± 6,43	28,8	176	257,7 ± 16,88	33,4	428
Осушаемый сосняк	25,4 ± 0,94	107,4 ± 9,19	32,0	184	202,6 ± 19,19	35,4	352

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

При перерасчёте выхода живицы с КДП на карру при нагрузке ствола в 50 %, в среднем, выход равнялся 274,5 г, тогда как по факту живицы выделилось лишь 230,1 г. Во всех вариантах опыта корреляция между поправочным коэффициентом, который необходимо вносить при перерасчёте выхода живицы с дециметровой карры на карру при нагрузке ствола в 50 %, и таксационным диаметром была установлена отрицательной (***r = -0,66***).

В целом, для изучаемых древостоев необходимо выполнять перерасчёт выхода живицы на нагрузку ствола в 50 % и использовать поправочные коэффициенты (табл. 3) при соответствующем диаметре заподсоченного дерева. Или же выполнять совокупный расчёт, внося поправку к итогу в ***0,68*** (в качестве множителя)**.**

В осушаемом сосняке после лесоводственного ухода средний вес сосновой живицы выше на ≈ 22 % относительно древостоя после проведённой гидротехнической мелиорации без ухода при меньшем коэффициенте изменчивости (табл. 4).

Отличия в отклонениях фактического выхода живицы от теоретического в приканальной части и центре межканального пространства осушаемой лесополосы оказались достаточно близкими и ими можно пренебречь, используя при расчётах предложенные коэффициенты.

В среднем полученные коэффициенты выше для осушаемых сосняков после проходной рубки ухода относительно древостоев после гидротехнической мелиорации без влияния заготовки древесины (рис. 4). Отмечена тенденция снижения поправочных коэффициентов с увеличением диаметра сосны. По данным графиков выявлена большая амплитуда флуктуаций с карр при нагрузке стволов в 50 % относительно полученного веса при дециметровой карре. Отмечены резкие флуктуации смоловыделения у сосен диаметром с 26 до 28 см в условиях осушения и проведённого лесоводственного ухода. В осушенных древостоях без ухода наблюдается увеличение выхода терпентина у деревьев диаметром выше 29 см.

По результатам статистического анализа установления связи между таксационным диаметром и выходом соснового терпентина была составлена табл. 5. Для установления связи между показателями таксационного диаметра и полученного веса терпентина с дециметровой карры в осушаемом сосняке в приканальном положении (ППП 8) было подобрано полиномиальное уравнение зависимости шестого порядка (рис. 5). Предложенное уравнение статистически надёжно (по критерию Фишера $F_{табл.} \leq F_{расч.}$; 4,2 ≤ 27,8).

а)

Б)

Рисунок 4. Графики смоловыделения терпентина в сосновых древостоях после лесоводственного ухода и проведённой гидротехнической мелиорации (а) и в условиях искусственного дренажа без ухода (б)
Figure 4. Graphs of turpentine exudation release in pine stands after thinning and carried out hydrotechnical reclamation (a) and under conditions of artificial drainage without thinning (б)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Таблица 5

Связь полученного веса терпентина и применяемой методики определения смоловыделения

Table 5

Relationship between the obtained weight of turpentine and the method used for determining the release of resin

Номер ППП | Number PPP	Таксационный диаметр и вес терпентина с дециметровой карры | Taxation diameter and weight of turpentine per decimeter carr			Таксационный диаметр и вес терпентина с карры при нагрузке в 50 % | Taxation diameter and weight of turpentine from carr with a trunk load of 50 %		
	Коэффициент корреляции (r) | Correlation coefficient (r)	Ошибка коэффициента корреляции (m_r) | Correlation coefficient error (m_r)	Достоверность коэффициента корреляции (t_r) | Reliability of the correlation coefficient (t_r)	Коэффициент корреляции (r) | Correlation coefficient (r)	Ошибка коэффициента корреляции (m_r) | Correlation coefficient error (m_r)	Достоверность коэффициента корреляции (t_r) | Reliability of the correlation coefficient (t_r)
4	-0,34	0,16	-2,11	0,08	0,18	0,44
5	0,56	0,12	4,54	0,38	0,16	2,45
8	0,49	0,14	3,59	0,64	0,11	5,98
9	0,51	0,13	3,78	0,56	0,12	4,51
Среднее (уходы) | Average (thinning)	0,10	0,18	0,56	0,24	0,17	1,40
Среднее (осушение) | Average (melioration)	0,50	0,14	3,65	0,63	0,12	5,82

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

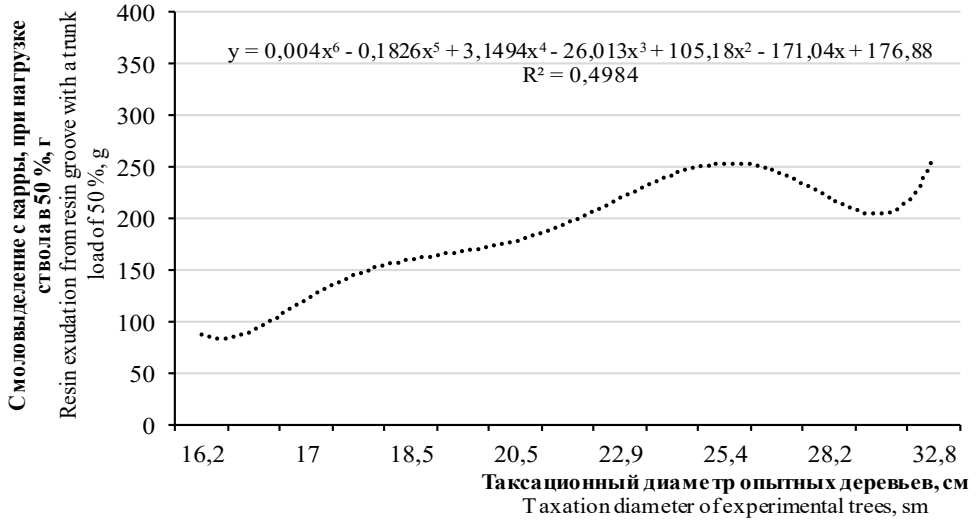


Рисунок 5. График смоловыделения с карры, при нагрузке ствола в 50 % на ППП 8

Figure 5. Graph of resin exudation from resin groove with a trunk load of 50 % on PPP 8

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Также в сосняке после проведённого лесоводственного ухода вблизи осушительного канала отмечен отрицательный уровень корреляции между таксационным диаметром и выделением терпентина с дециметровой карры. Наибольшая положительная зависимость между анализируемыми показателями была отмечена в осушаемых условиях.

По полученным результатам в табл. 5 была построена графическая зависимость таксационного диаметра импактных сосен и смоловыделения при нагрузке каррами в 50 %.

Выводы

Математический перерасчёт веса соснового терпентина, полученного с дециметровой карры на сосновых деревьях в Сокольском районе Вологодской области, выполненный с использованием поправочных коэффициентов, в количество живицы при нагрузке стволов в 50 % завышает фактический результат. Следует использовать поправку к полученному результату в ***0,68*** или же воспользоваться составленной авторами таблицей поправочных коэффициентов, которые учитывают диаметр сосновых деревьев. Подтверждено положительное влияние лесоводственного ухода (проходные рубки) на выход терпентина у сосняков на торфяных почвах (на ≈ 22 % выше относительно лесных объектов без лесоводственного ухода). Смолопродуктивность осушаемых сосновых древостоев по градации А. Л. Федяева оценена как «очень высокая» (13,4 г с карроподновки для осушаемых сосновых насаждений и 14,2 г с карроподновки для мелиорируемых сосняков после лесоводственного ухода).

Список литературы

1. Вариводина И. Н., Высоцкий А. А., Вариводин В. А. Смолопродуктивность и технические свойства древесины. Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2017; 4: 31-35. DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-4-31-35.
2. Новосёлов А. С., Дружинин Н. А. Сезонная динамика смолопродуктивности осушаемых сосновых древостоев. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017; 1: 21-29. DOI: http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.21.
3. Новосёлов А.С. Смолопродуктивность сосны на объекте гидротехнической мелиорации после несплошной заготовки древесины. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал 2019; 2: 67-77. DOI: http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.67.
4. ОСТ 13-80-79. Подсочка сосны. Термины и определения. Дата введения 01.01.1981. Москва: Минлесбумдревпром. 1979. 22 с.
5. Пастухова Н. О., Горкин А. И., Лебедева О. П. Сравнительный анализ смолопродуктивности сосны в разных лесорастительных условиях. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018; 2: 49-57. DOI: http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.2.49.
6. Пастухова Н. О., Лебедева О. П., Поташева Ю. И. Влияние осушительной мелиорации на выход живицы сосны в условиях северной подзоны тайги Архангельской области. Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2017; 1: 36-40. DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-1-36-40.
7. Рубцов В. Г. Закладка и обработка пробных площадей на осушенных насаждениях. Ленинград: ЛеНИИЛХ, 1977. 44 с.
8. Третьяков С. В. Полевой лесотаксационный справочник. Архангельск: САФУ, 2016. 245 с.
9. Gryazkin A., Bespalova V., Samsonova I. (et al.). Potential reserves and development of non-wood forest resources. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. 453-468. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012007.
10. Heinze A., Thomas W., Kuyper, L. (et al.) Tapping into nature's benefits: values, effort and the struggle to coproduce pine resin. Ecosystems and People. 2021. 69-86, DOI: https://doi.org/10.1080/26395916.2021.1892827.
11. Llevot A., Grau É., Carlotti S. (et al.) Pine resin: Feedstock for the synthesis of new polymers? La résine de pin, source de nouveaux polymères? Actualite Chimique. 2014; 390: 79-81, Retrieved from www.scopus.com.

12. Zhao Z., Wang J., Lu Y. (et al.) Demand analysis of individuation pine resources for fine chemical utilization of pine oleoresin. Chemistry and Industry of Forest Products. 2021; 41 (3): 1-10, DOI: https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2417.2021.03.001.

References

1. Varivodina I. N., Vysockij A. A., Varivodin V. A. Smoloproduktivnost' i tekhnicheskie svojstva drevesiny [Resin productivity and technical properties of wood]. Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin = Forest Gazette. Forestry Bulletin. 2017; 4: 31-35 (In Russian). DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-4-31-35

2. Novosyolov A. S., Druzhinin N. A. Sezonnaya dinamika smoloproduktivnosti osushaemyh sosnovyh drevostoev [Seasonal dynamics of resin productivity of drained pine stands]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal = Proceedings of higher educational institutions. Forest Journal. 2017; 1: 21-29 (In Russian). DOI: http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.21

3. Novosyolov A. S. Smoloproduktivnost' sosny na ob"ekte gidrotekhnicheskoj melioracii posle nesploshnoj zagotovki drevesiny [Pine resin productivity at a hydrotechnical reclamation facility after non-continuous timber harvesting]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal = Proceedings of higher educational institutions. Forest Journal. 2019; 2: 67-77 (In Russian). DOI: https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.2.67

4. OST 13-80-79. Podsochka sosny. Terminy i opredeleniya [Pine tapping. Terms and Definitions]. Data vvedeniya 01.01.1981. Moscow, Minlesbumdrevprom. 1979. 22 p (In Russian).

5. Pastuhova N. O., Gorkin A. I., Lebedeva O. P. Sravnitel'nyj analiz smoloproduktivnosti sosny v raznyh lesorastitel'nyh usloviyah [Comparative analysis of pine resin productivity in different forest conditions] Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal = Proceedings of higher educational institutions. Forest Journal. 2018; 2: 49-57 (In Russian). DOI: https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.2.49

6. Pastuhova N. O., Lebedeva O. P., Potasheva YU. I. Vliyanie osushitel'noj melioracii na vyhod zhivicy sosny v usloviyah severnoj podzony tajgi Arhangel'skoj oblasti [Influence of drainage reclamation on the yield of pine resin in the northern taigi subzone of the Arkhangelsk region]. Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin = Forest Gazette. Forestry Bulletin. 2017; 1: 36-40. DOI: https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-1-36-40

7. Rubcov V. G. Zakladka i obrabotka probnyh ploshchadej na osushennyh nasazhdeniyah [Establishment and processing of test plots on drained plantations]. Leningrad: LenNIILH. 1977. 44 p (In Russian).

8. Tret'yakov S. V. Polevoj lesotaksacionnyj spravochnik [Field Forest inventory guide]. Arkhangelsk: SAFU, 2016. 245 p. (In Russian).

9. Gryazkin A., Bespalova V., Samsonova I. (et al.). Potential reserves and development of non-wood forest resources. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. 453-468. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012007

10. Heinze A., Thomas W., Kuyper, L. (et al.) Tapping into nature's benefits: values, effort and the struggle to coproduce pine resin. Ecosystems and People. 2021. 69-86, DOI: https://doi.org/10.1080/26395916.2021.1892827

11. Llevot A., Grau É., Carlotti S. (et al.) Pine resin: Feedstock for the synthesis of new polymers? La résine de pin, source de nouveaux polymères? Actualite Chimique. 2014; 390: 79-81, Retrieved from www.scopus.com

12. Zhao Z., Wang J., Lu Y. (et al.) Demand analysis of individuation pine resources for fine chemical utilization of pine oleoresin. Chemistry and Industry of Forest Products. 2021; 41 (3): 1-10, DOI: https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-2417.2021.03.001

Сведения об авторах

✉ *Попов Олег Сергеевич* – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2464-1729, e-mail: popovoleg81@gmail.com.

Третьяков Сергей Васильевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, руководитель «Центра исследования лесов» высшей школы естественных наук и технологий, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», набережная Северной Двины, 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5982-3114, e-mail: s.v.tretyakov@narfu.ru.

Новосёлов Анатолий Сергеевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», ул. Ленина, 15, г. Вологда, Российская Федерация, 160000, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6907-0424, e-mail: AnSer-Rock-Bard@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Oleg S. Popov* – Postgraduate student of the Department of forestry and forest management, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov”, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk city, Russian Federation, 163002, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2464-1729, e-mail: popovoleg81@gmail.com.

Sergey V. Tretyakov – Doctor of Science in Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Forestry and Forest Inventory, Head of the Forest Research Center of the Higher School of Natural Sciences and Technologies, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov”, Northern Dvina embankment, 17, Arkhangelsk city, Russian Federation, 163002, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5982-3114, e-mail: s.v.tretyakov@narfu.ru.

Anatoly S. Novoselov – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor, Vologda State University, Lenin str., 15, Vologda city, Russian Federation, 160000, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6907-0424, e-mail: AnSer-Rock-Bard@mail.ru.

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/3

УДК 628.355.2

ВОЗДЕЙСТВИЕ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СОСТОЯНИЕ БИОЦЕНОЗА АКТИВНОГО ИЛА И ЕГО ГИДРОБИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Юлия Н. Дочкина[1] ✉, dochkina.j.n@yandex.ru, 0000-0001-9113-1564
Владимир И. Корчагин[1], kvi-vgta@rambler.ru, 0000-0001-7212-1627
Алина А. Плякина[1], alina.plyakina7@gmail.com, 0000-0001-7848-2685

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», пр. Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия*

Качество биологической очистки сточных вод напрямую зависит не только от концентрации загрязняющих веществ, но и от состояния биоценоза активного ила. Оценка состояния активного ила осуществляется по двум группам критериев: гидрохимическим (массовая концентрация, иловый индекс, скорость оседания) и гидробиологическим (видовое разнообразие, активность, количество микроорганизмов). На показатели жизнедеятельности активного ила влияет ряд факторов. Недостаточно изученным является влияние уровня pH и температуры стоков на гидробиологические и гидрохимические характеристики биоценоза. Целью работы является изучение влияния сточных вод с различными pH = 3, 5, 8, 9 10 и температурой t = 5, 10, 30, 40 °C на гидрохимические и гидробиологические показатели. В результате исследований установлено: при pH = 3, 5, 10 наблюдается падение массовой концентрации ниже 2,5 г/дм^3, а иловый индекс повышается более чем до 200 см^3/г, гидробиологический анализ подтверждает ухудшение состояния активного ила в части критического снижения видового разнообразия. При воздействии стоков с температурой t = 5, 40 °C наблюдается быстрое снижение массовой концентрации до критических значений менее 1 г/дм^3, в то же время иловый индекс падает, а скорость оседания возрастает при t = 5 °C, в отличие от среды с температурой t = 40 °C, где наблюдается вспухание биоценоза с повышением илового индекса и снижением скорости оседания.

Ключевые слова: активный ил, биоценоз, температура, pH, абиотические факторы

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Дочкина Ю.Н. Воздействие абиотических факторов на состояние биоценоза активного ила и его гидробиохимические показатели / Ю.Н. Дочкина, В.И. Корчагин, А.А. Плякина // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 29–42. – *Библиогр.: с. 39–42 (19 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/3.

Поступила: 14.11.2021 ***Принята к публикации***: 20.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

IMPACT OF ABIOTIC FACTORS ON THE STATE OF ACTIVATED SLUDGE BIOCENOSIS AND ITS HYDROBIOCHEMICAL PARAMETERS

Yulia N. Dochkina[1] ✉, dochkina.j.n@yandex.ru, 0000-0001-9113-1564
Vladimir I. Korchagin[1], kvi-vgta@rambler.ru, 0000-0001-7212-1627
Alina A. Plyakina[1], alina.plyakina7@gmail.com, 0000-0001-7848-2685

[1] *FSBEI HE Voronezh State University of Engineering Technologies, 394036, 19 Revolyutsii Ave., Voronezh, Russian Federation*

Abstract

The quality of biological wastewater treatment directly depends not only on the concentration of pollutants, but also on the state of the activated sludge biocenosis. The assessment of the state of activated sludge is carried out according to two groups of criteria: hydrochemical (mass concentration, sludge index, sedimentation rate) and hydrobiological (species diversity, activity, number of microorganisms). A number of factors affect vital functions of activated sludge. The influence of pH level and temperature of effluents on the hydrobiological and hydrochemical characteristics of the biocenosis is insufficiently studied. The aim of the work is to study the effect of wastewater with different pH = 3, 5, 8, 9 10 and temperature t = 5, 10, 30, 40 ° C on hydrochemical and hydrobiological indicators. As a result of the research, it was established: at pH = 3; 5; 10. There is a decrease in the mass concentration below 2.5 g/dm^3, and the sludge index rises to more than 200 cm^3/g. Hydrobiological analysis confirms the deterioration of the state of activated sludge in terms of a critical decrease in species diversity. A rapid decrease in the mass concentration to critical values of less than 1 g/dm^3 is observed when exposed to effluents with a temperature of t = 5, 40 °C. At the same time, the sludge index decreases, and the sedimentation rate increases at t = 5 °C, in contrast to the medium with a temperature of t = 40 °C, where swelling of the biocenosis is observed with an increase in the sludge index and decrease in the sedimentation rate.

Keywords: activated sludge, biocenosis, temperature, pH, abiotic factors

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

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

***For citation*:** Dochkina Yu.N., Korchagin V.I., Plyakina A.A. (2021) The effect of abiotic factors on the state of active sludge biocenosis and hydrobiochemical parameters. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 29-42 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/3.

Received: 14.11.2021 ***Revised:*** 10.12.2021 ***Accepted***: 20.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

По данным государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды РФ» за 2019 г., на втором месте по объему сброса сточных вод находится вид экономической деятельности, включающий в том числе водоотведение. По официальным данным Росводресурсов, в 2019 году объем загрязненных сточных вод составил 12602,33 млн м^3, из которых 2313,93 млн м^3 было сброшено без очистки, а остаток приходился на недостаточно очищенные сточные воды [1].

Одной из ключевых проблем современной экологии является недостаточное извлечение загрязняющих веществ из сточных вод на линии биологической очистки, что приводит к сверхнормативному сбросу токсикантов в поверхностные водные объекты [2], а впоследствии негативно сказывается на качестве различных объектов окружающей среды, в частности питьевой воды [3,4].

Причины неэффективной работы биологических очистных сооружений могут быть различны: низкая или высокая концентрация питательных элементов в стоках, несоблюдение режима аэрации, износ оборудования технологических линий, перепады объемов поступающих на очистку стоков [5], высокое давление, радиация, недостаточное содержание растворенного кислорода, наличие токсикантов [6], однако, немаловажными параметрами стабильной работы системы биологического окисления являются температура и уровень кислотности (pH) очищаемых стоков [7-11], которые являются основными абиотическим факторами, влияющими на биологическую очистку сточных вод. Изменение и колебание абиотических параметров окружающей среды неизбежно приведет к изменениям и нарушениям функционирования биоценоза [12,13].

В настоящее время наблюдается тенденция по использованию различных физико-химических способов предварительной обработки сточных вод, предусматривающих добавление подкисляющих или подщелачивающих реагентов для более эффективного извлечения загрязнителей. Такие технологические приемы приводят к изменению уровня pH обработанных сточных вод перед их подачей на линию биологического окисления, тем самым создавая потенциально негативные условия жизнедеятельности для биоценоза активного ила [14].

Авторами зарубежных исследований [7-9,15] длительного влияния изменений температурного режима на биоокислительные процессы показано, что способность организмов активного ила к нитрификации снижается при понижении температуры за счет повышения концентрации аммония в сточных водах, а, следовательно, их возросшей токсичности.

Отечественными исследователями также установлено, что оптимальными условиями для формирования биопленки на носителе и повышения эффективности извлечения азотсодержащих соединений является значение pH до 9 и температуры в диапазоне 30-35 ^{o}C [16, 17].

Увеличение температуры очищаемых стоков до 40 ^{o}C приводит к снижению количества растворенных биоразлагаемых веществ и росту бактерий денитрифакоторов [18].

В результате проведенного аналитического обзора выявлено, что преимущественное внимание учеными уделяется нарушениям технологических параметров биологической очистки [19], таких как эффективность извлечения загрязнителей, формирование биопленки на носителях. В то время, как немаловажным является изучение влияния изменения температуры и уровня pH очищаемых стоков на показатели жизнеспособности свободноплавающего активного ила: иловый индекс, массовая концентрация, скорость оседания; а также гидробиологический показатель - видовое разнообразие.

Материалы и методы

Объекты исследования

1. Активный ил очистных сооружений г. Воронежа. Гидрохимические показатели исходного активного ила: иловый индекс 104,0-132,0 см^3/г; массовая концентрация 3,5-5,8 г/дм^3; скорость оседания 0,41-0,58 см^3/мин; надиловая вода прозрачная; хлопок плотный, компактный, гранулообразный.

Гидробиологические показатели представлены в табл. 1 с учетом следующей шкалы встречаемости: 1 – единичные представители, 2 – малочисленны, 3 – среднечисленны, 4 – многочисленны.

Микрофотографии проб исходного активного ила представлены на рис. 1.

Таблица 1

Гидробиологические показатели активного ила

Table 1

Hydrobiological indicators of active sludge

Укрупненные индикаторные группы Enlarged indicator groups	Балл встречаемости Conditional occurrence score
Euglypha	3-4
Kinetophragminophora	3-4
Spirotrihida	3-4
Peritricha	3-4
Rotifera (Rotaria, Philodina, Cephalodella)	2-3
Zoogloea ramigera	2-3
Testacealobsia	2-3
Gymnamoebia	1-2
Phytomastigophorea	1-2
Nematoda Monhystera	1-2
Algae	1-2

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

2. Синтетическая сточная вода, приготовленная по ГОСТ 32509-2013 «Вещества поверхностно-активные. Метод определения биоразлагаемости в водной среде». Компонентный состав синтетической сточной воды представлен в табл. 2.

3. Лимонная кислота.

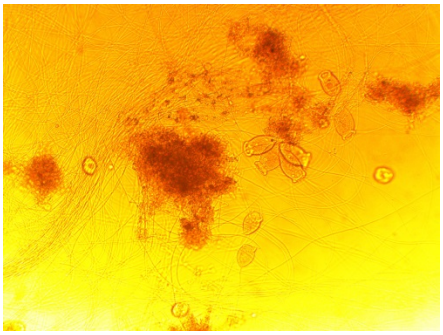
4. Гидроксид натрия.

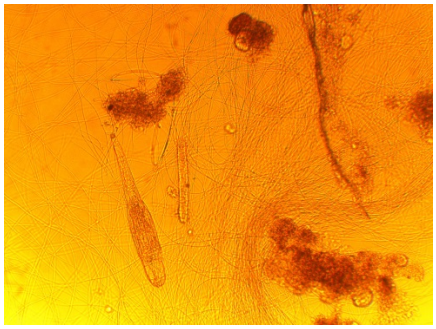
Методы исследования

1. Водородный показатель pH определяли при помощи pH метра в соответствии с ГОСТ 33776-2016 «Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды».

2. Температуру определяли с использованием ртутного водного термометра.

3. Изучение гидрохимических показателей активного ила осуществляли по комплекту методик: «Определение массовой концентрации активного ила, илового индекса, прозрачности надиловой воды» ФР 1.31.2008.04397, ФР 1.31.2008.04398, ФР 1.31.2008.04400.





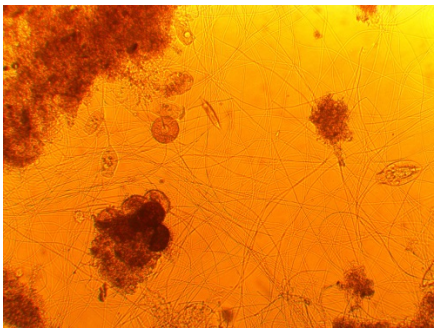


Рисунок 1. Микрофотографии исходного активного ила

Figure 1. Micrographs of the initial active sludge

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

4. Гидробиологические показатели активного ила определяли посредством микроскопирования электронным микроскопом Livenhuk G670T с использованием определителя видового разнообразия микроорганизмов.

5. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, моделирующей работу проточного аэротенка-вытеснителя, представленной на рис. 2.

Таблица 2

Состав синтетической сточной воды

Table 2

Composition of synthetic wastewater

Наименование компонента Name of the component	Концентрация, мг/дм^3 Concentration, mg/dm^3
Ацетат натрия Sodium acetate	50,0
Гидроортофосфат калия Potassium hydroorthophosphate	25,0
Карбонат натрия Sodium carbonate	50,0
Дигидроортофосфат аммония Ammonium dihydroorthophosphate	25,0
Хлорид кальция Calcium chloride	7,5
Сульфат магния Magnesium sulfate	5,0
Пептон ферментативный Peptone enzymatic	80,0

Источник: ГОСТ 32509-2013 «Вещества поверхностно-активные. Метод определения биоразлагаемости в водной среде»

Source: GOST 32509-2013 "Surfactants. Method for determining biodegradability in an aquatic environment"

Лабораторная установка включает в себя емкость для дозирования сточной воды, аэротенк – смеситель, емкость для отстаивания избыточного активного ила, компрессор.

Результаты и обсуждение

Изучение влияния концентрации водородных ионов на состояние биоценоза активного ила проводили при уровне pH = 3, 5, 8, 9, 10 путем добавления растворов гидроксида натрия и лимонной кислоты к синтетической сточной воде.

Изучение влияния температуры стоков на состояние биоценоза активного ила проводили при температурах: 5 °C, 10 °C, 30 °C, 40 °C путем охлаждения и нагревания синтетической сточной воды.

Условия, при которых осуществляли биоокисление, следующие: скорость подачи стока в аэротенк 0,5 дм^3/час, расход воздуха на аэрацию одного аэротенка 2 дм^3/мин, режим работы непрерывный, аэрация мелкопузырчатая,
равномерная, интенсивная, время проведения исследования 5 недель, количество параллельных опытов на каждое значение pH и температуры – 3.

Полученные конечные результаты влияния концентрации водородных ионов и температуры подаваемого стока на состояние биоценоза активного ила представлены в таблице 3.

Динамика основных гидрохимических показателей при изменении pH и температуры стока представлена на рисунке 3, на рисунке 4 представлена визуализация полученных данных в виде статических диаграмм и таблиц расчетных значений.

Микрофотографии конечных проб активного ила после воздействия pH приведены на рисунке 5, а температуры приведены на рисунке 6.

Рис. 2. Экспериментальная установка
Figure 2. Experimental setup
Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

Таблица 3

Результаты влияния pH и температуры на гидрохимические показатели активного ила

Table 3

Results of the influence of pH and temperature on the hydrochemical parameters of active sludge

Показатель Indicator	Уровень pH pH value					Температура, °C Temperature, °C			
	3	5	8	9	10	5	10	30	40
Иловый индекс, см^3/г Silt index, cm^3/g	351,05	312,87	141,7	131,9	201,23	41,3	117,8	144	487,1
Массовая концентрация, г/дм^3 Mass concentration, g/dm^3	1,04	1,6	4,5	4,06	2,4	0,74	2,5	1,98	0,83
Скорость оседания, см^3/мин Settling rate, cm^3/min	0,83	0,73	0,47	0,3	0,4	0,85	0,59	0,74	0,2
Прозрачность надиловой воды Water transparency	мутная muddy	прозрачная transparent				прозрачная transparent			мутная muddy
Хлопок Accumulation	диспергированный separated	крупный, компактный large, compact		средний, компактный medium, compact		мелкий, компактный small, compact	крупный, компактный large, compact		средний, компактный medium, compact

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

Анализ табличных данных и диаграмм показывает, что при воздействии на биоценоз активного ила сточных вод с уровнем pH = 3 наблюдается устойчивое падение массовой концентрации на всем протяжении эксперимента до значения 1,04 г/дм^3, в то время как иловый индекс возрастает до критических значений 351,05 см^3/г. Значения скорости оседания коррелируют со значениями илового индекса и также показывают устойчивый рост при снижении прозрачности надиловой воды, свидетельствуя о сгущении иловой жидкости.

При воздействии на активный ил сточных вод с pH = 5 прослеживается более благоприятный сценарий жизнедеятельности биоценоза: массовая концентрация снижается до нижних предельных значений 1,6 г/дм^3, а иловый индекс и скорость оседания в первые две недели воздействия находятся в допустимом диапазоне, после чего на третьей неделе наблюдается резкий скачок до критических величин 312,87 см^3/г и 0,73 см^3/мин. соответственно.

Сточная вода, имеющая pH = 8 и pH = 9, не оказывает пагубного воздействия на гидрохимические показатели жизнедеятельности на всем протяжении эксперимента. Величины основных показателей находятся в рабочих диапазонах активного ила городских очистных сооружений (массовая концентрация 2,5-6 г/дм^3, иловый индекс 90-140 см^3/г, скорость оседания 0,4-0,6 см^3/мин.). Стоит отметить, что при воздействии стоков с pH = 8 динамика показателей показывает стабильность, в то время как при воздействии сточных вод с pH = 9 наблюдаются скачкообразные изменения.

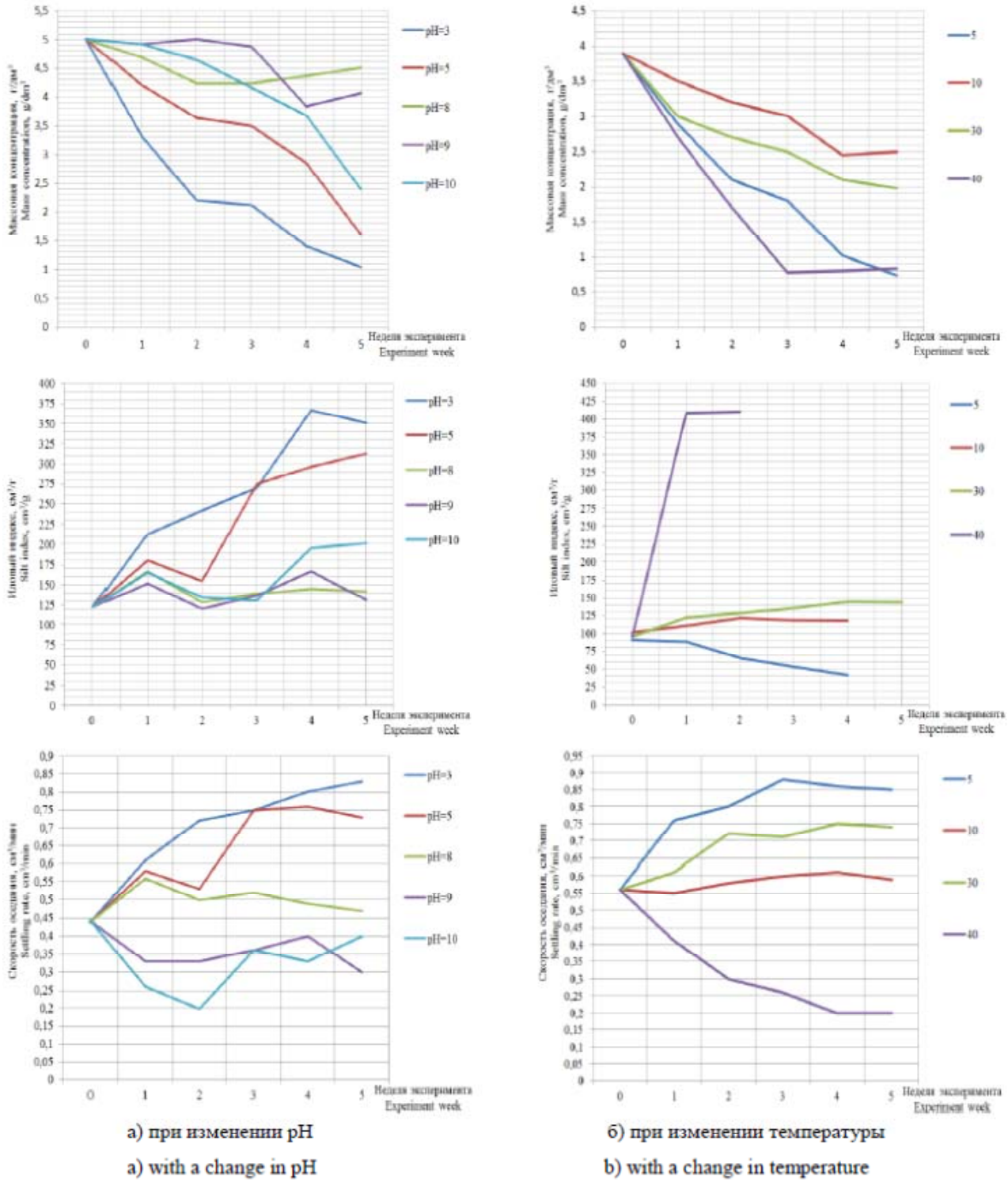
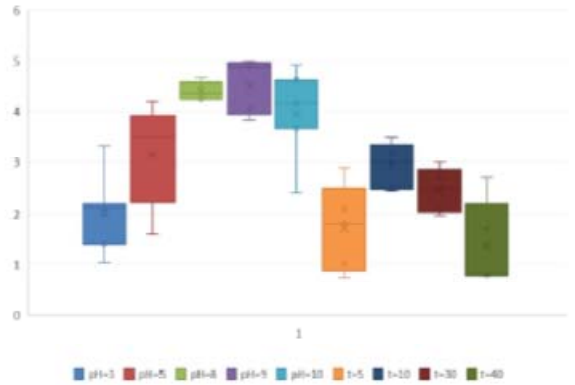


Рисунок 3. Динамика гидрохимических показателей:

Figure 3. Dynamics of hydrochemical parameters:

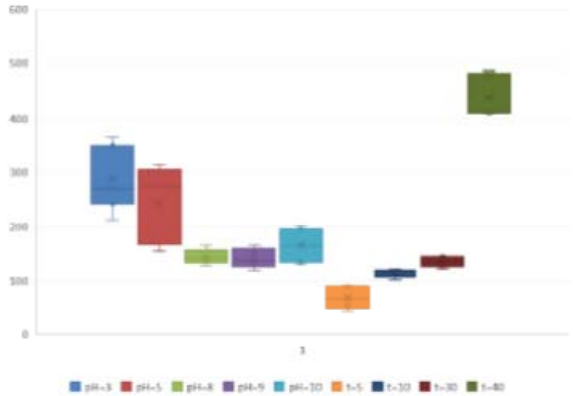
Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data



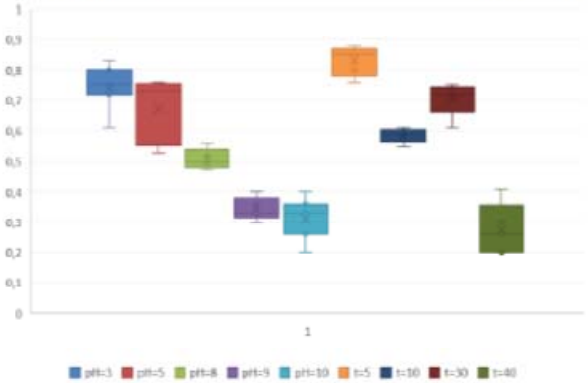
значение value	pH					t, °C			
	3	5	8	9	10	5	10	30	40
min	1,04	1,6	4,24	3,84	2,4	0,74	2,45	1,98	0,78
Q_1	1,4	2,86	4,24	4,06	3,68	1,02	2,5	2,1	0,8
Me	2,12	3,5	4,36	4,88	4,16	1,8	3,01	2,5	0,83
Q_3	2,2	3,64	4,5	4,92	4,64	2,1	3,2	2,7	1,7
max	3,32	4,2	4,68	5	4,92	2,89	3,5	3	2,7

а) совокупность данных по массовой концентрации
a) a set of data on mass concentration



значение value	pH					t, °C			
	3	5	8	9	10	5	10	30	40
min	212,6	155,15	128,2	120	130,4	41,3	101,2	122,3	408,2
Q_1	242,1	180,75	138,95	131,9	134,45	53,2	110,4	128,4	410,1
Me	270,13	274,3	141,7	137,1	165,15	65,4	117,8	135,2	412,4
Q_3	351,05	296,47	144,7	151,9	195,65	88,7	118,7	144	480,8
max	366,7	312,87	166,8	166,67	201,23	90,75	121,3	144,8	487,1

б) совокупность данных по иловому индексу
b) the set of data on the silt index



значение value	pH					t, °C			
	3	5	8	9	10	5	10	30	40
min	0,61	0,53	0,47	0,3	0,2	0,76	0,55	0,61	0,2
Q_1	0,72	0,58	0,49	0,33	0,26	0,8	0,58	0,71	0,2
Me	0,75	0,73	0,5	0,33	0,33	0,85	0,59	0,72	0,26
Q_3	0,8	0,75	0,52	0,36	0,36	0,86	0,6	0,74	0,3
max	0,83	0,76	0,56	0,4	0,4	0,88	0,61	0,75	0,41

с) совокупность данных по скорости оседания
c) a set of data on the Settling rate

Рисунок 4.Статистические диаграммы

Figure 4. Statistical charts

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

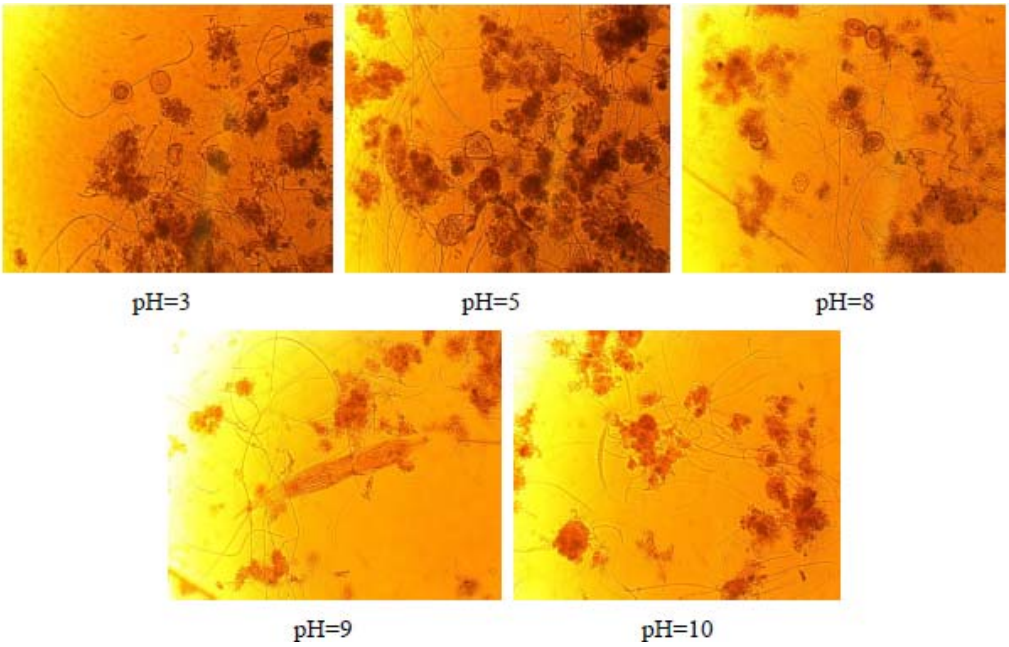


Рисунок 5. Микрофотографии проб активного ила при изменении pH

Figure 5. Micrographs of active sludge samples with a change in pH

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

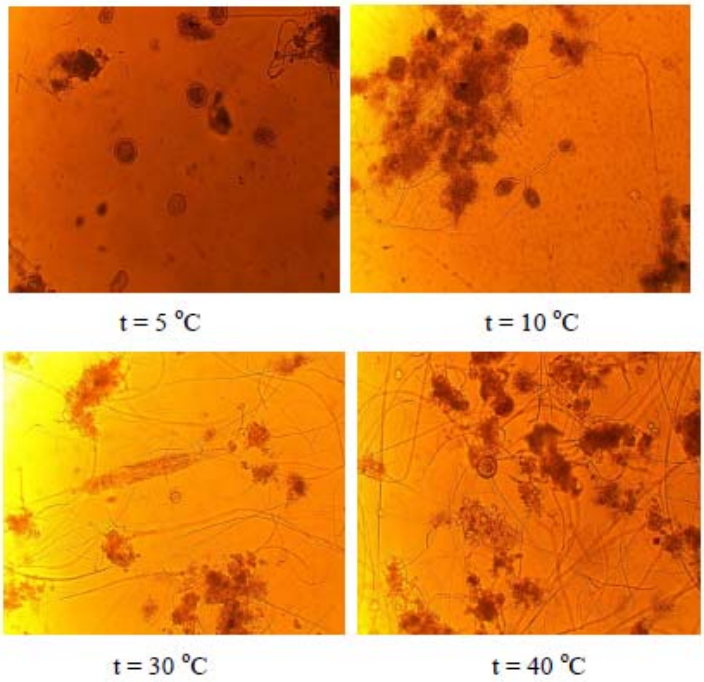


Рисунок 6. Микрофотографии проб активного ила при изменении температуры

Figure 6. Micrographs of active sludge sampleswith a change in temperature

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

При влиянии на активный ил стоков, имеющих pH = 10, наблюдается резкое снижение скорости оседания до 0,4 см^3/мин, что говорит о начале процесса утяжеления хлопка активного ила и повышении его седиментационных свойств. При этом значения массовой концентрации и илового индекса не попадают в области критических значений, находясь на границе предельно допустимых величин. Анализ экспериментальных данных, отражающих влияние стоков с различной температурой на биоценоз активного ила показывает, что при температурах стоков 5 ^{o}C и 40 ^{o}C наблюдается быстрое снижение массовой концентрации до критических значении менее 1 г/дм^3, а также стабильное снижение илового индекса до значений менее 42 см^3/г и возрастание скорости оседания до 0,85 см^3/мин. при температуре стоков 5 ^{o}C. Это свидетельствует об утяжелении хлопка активного ила и его минерализации при снижении биологической активности в среде низких температур. При температуре стока 40 ^{o}C напротив наблюдается резкий скачок илового индекса до критической величины 487,1 см^3/г и снижение скорости оседания до 0,2 см^3/мин., что говорит о процессе вспухания активного ила, связанного со снижением концентрации растворенного кислорода при повышении температуры водной среды.

При взаимодействии сточных вод с температурой 10 ^{o}C и 30 ^{o}C и биоценоза активного ила значимых отличий в гидрохимических показателях выявлено не было. Однако, стоит отметить, что при температуре 30 ^{o}C прослеживается тенденция к более интенсивному снижению массовой концентрации и повышению илового индекса. Значения скоростей оседания значимо не отличаются. Все величины основных показателей находятся в допустимом диапазоне.

Результаты микроскопирования образцов активного ила после воздействия стоков с различным уровнем pH коррелируют со значениями гидрохимических показателей.

После воздействия кислых стоков с pH = 3 происходит снижение видового разнообразия. Представители исходных индикаторных укрупненных групп сначала сменяются малочисленными живыми представителями прикрепленных инфузорий *Peritricha*, коловраток *Habrotrochidae*, коловраток *Rotifera*, а по завершении исследования в образцах обнаруживаются цисты микрорганизмов, нарастание нитчатых бактерий, неподвижные единичные представители коловраток *Rotifera*, и блуждающих инфузорий *Peritricha*.

Образцы активного ила после взаимодействия со сточными водами, имеющими pH = 5, характеризуются сменой биоценоза от первичных живых и подвижных среднечисленных коловраток *Rotifera*, прикрепленных инфузорий *Peritricha*, кругоресничных инфузорий *Oligohymenophora,* филозей *Euglypha*, голых амеб *Gymnamoebia*, *Zoogloea ramigera*, сосущих инфузорий *Suctoria*, инфузорий *Litonotus* до часто встречающихся филозей *Gromia*, нитчатых бактерий, филозей *Euglypha*, коловраток *Rotaria*, коловраток *Cephalodella*, растительных жгутиконосцев *Phytomastigophorea*, голых амеб, инфузорий *Spirotrihida*, *Kinetophragminophora* и *Trochilia*.

Гидробиологический анализ проб биоценоза после влияния сточных вод с pH = 8 и pH = 9 показал, что видовое разнообразие стабильно представлено достаточным количеством укрупненных индикаторных групп таких, как *Zoogloea ramigera*, прикрепленные инфузории *Peritricha*, различные коловратки *Rotaria*, *Philodina* и *Cephalodella*, голые амебы *Gymnamoebia*, филозеи *Gromia* и *Euglypha*, различные инфузории *Spirotrihida* и *Kinetophragminophora*, растительные жгутиконосцы *Phytomastigophorea*.

Микроскопирование образца активного ила после воздействия сточных вод с уровнем pH = 10 показывает, что в пробах присутствует среднечисленное количество нематод, инфузорий *Litonotus*, прикрепленных инфузорий *Peritricha*, *Zoogloea ramigera*, коловраток *Cephalodella*, множество кругоресничных инфузорий *Polyhymenophora* и *Oligohymenophora*.

По результатам микроскопирования видовое разнообразие образцов активного ила после взаимодействия со стоками, имеющими температуру 5 ^{o}C, представлено преимущественно цистами и единичными *Zoogloea ramigera.* Изредка встречаются нитчатые бактерии и водоросли *Algae* и грибы *Fungi*. Образцы биоценоза, смешанного со сточны-

ми водами, имеющими температуру 10 °С и 30 °С существенно не отличаются по результатам микроскопирования. В большей или меньшей степени в образцах присутствуют представители основных индикаторных укрупненных групп микроорганизмов активного ила такие как, прикрепленные инфузории *Peritricha*, коловратки *Rotifera*, *Rotaria*, *Cephalodella*, растительных жгутиконосцы *Phytomastigophorea*, *Zoogloea ramigera*, кругоресничные инфузорий *Kinetophragminophora* и *Spirotrihida*, раковинные амебы *Testacealobsia*, круглые черви *Nematoda Monhystera*.

В результате изучения под микроскопом образцов биоценоза, подвергшихся воздействию сточных вод с температурой 40 °С, установлено, что активный ил не имеет активных подвижных представителей микроорганизмов, а представлен преимущественно нитчатыми бактериями, цистами, *Zoogloea ramigera*, единичными неподвижными представителями коловраток *Cephalodella* и блуждающих инфузорий *Peritricha*.

Выводы

Абиотические факторы оказывают значимое влияние на состояние биоценоза активного ила, в частности на его гидрохимические (массовая концентрация, иловый индекс, скорость оседания) и гидробиологические (видовое разнообразие) характеристики.

При близких к нейтральной или слабощелочной среде значениях pH = 5-9, а также при температуре стоков в диапазоне 10-30 °С величины основных гидрохимических показателей состояния активного ила находятся в допустимых диапазонах.

При понижении уровня pH происходит разрушение хлопка, как следствие – седиментационные свойства активного ила ухудшаются, активный ил плохо осаждается во вторичных отстойниках и в больших количествах выносится из системы. Это неизбежно приводит к снижению массовой концентрации активного ила в аэротенках и ухудшению качества очистки сточных вод. При высоких уровнях pH наблюдается стабильный рост илового индекса, что свидетельствует о вспухании биоценоза.

Данные гидробиологического исследования показывают, что в щелочной среде наблюдается преимущественно развитие *Nematoda Monhystera*, *Litonotus*, *Peritricha*, *Zoogloea ramigera*, *Cephalodella*, *Polyhymenophora*, *Oligohymenophora*, в кислой среде наблюдается повышенное количество цист микроорганизмов, нитчатые бактерии, *Rotifera*, блуждающие *Peritricha*.

При температуре 40 °С растворимость кислорода снижается и гидрохимические показатели активного ила заметно ухудшаются, наблюдается нитчатое вспухание, образование большого количества цист, встречаются единичные *Cephalodella* и *Peritricha*. При воздействии на биоценоз стоков с температурой 5 °С наблюдается критическое снижение массовой концентрации, а видовое разнообразие представлено многочисленными цистами, единичными *Cephalodella* и блуждающими *Peritricha*.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году : государственный доклад. Москва : Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2020. 1000 с.

2. Korchagin V. I., Dochkina Yu. N., Popova L. V., Denisova-Barabash E. A. Extraction nutrient substrate from highly concentrated poultry processing plants effluents. Earth and environmental science. 2020. EESE6402062. DOI: 10.1088/1755-1315/640/2/022062.

3. Ашурбекова Т. Н., Исаева Н. Г., Мурзаева А. Н. Сравнительный анализ качества артезианских вод. Теоретическая и прикладная экология. 2018;3: 40–47. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-040-047.

4. Бабушкина, Ю. А., Назаренко Н. Н. Миграция поллютантов и загрязнение подземных вод при добыче железных руд. Теоретическая и прикладная экология. 2018; 3: 55–61. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-055-061.

5. Дочкина Ю. Н., Студеникина Л. Н., Корчагин В. И. Влияние природы питательного субстрата на гидробиологические и гидрохимические показатели активного ила. Материалы LVII отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2018 год. Воронеж, 2019. С. 106.

6. Довгаль И. В., Сергеева Н. Г. Сидячие инфузории (Ciliophora) из экстремальных местообитаний. Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Биология». 2016; 4: 385–397. DOI: 10.17516/1997-1389-2016-9-4-385-397.

7. Weirich C. E., Feiden A., Souza C. S. (et al.) Temperature influences swine wastewater treatment by aquatic plants. Scientia Agricola. 2021; 78: 1–7. DOI: 10.1590 / 1678-992X-2019-0325.

8. Liu K., Hang Q., Yuan Q. (et al.) Influence of temperature on MBBR denitrification for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent. Research of Environmental Sciences. 2016;29 (06): 877-886. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.06.12.

9. Zhou X., Bolun L., Jun W. (et al.) Temperature influenced the comammox community composition in drinking water and wastewater treatment plants. Microbial ecology. 2021; 82: 870-884. DOI: 10.1007/s00248-021-01724-9.

10. Daud M, Hina R., Muhammad A. (et al.) Review of upflow anaerobic sludge blanket reactor technology: effect of different parameters and developments for domestic wastewater treatment. Journal of Chemistry. 2018; 3: 1-13. DOI: 10.1155/2018/1596319.

11. Cho, S. Cicilia K., Nguyen V. Performance of anammox processes for wastewater treatment: a critical review on effects of operational conditions and environmental stresses. Water. 2020; 12(1): 20. DOI: 10.3390/w12010020.

12. Кравчук Е. С., Дубовская О. П., Шулепина С. П. (и др.) Влияние антропогенных факторов на экосистему протоки р. Енисей в черте города Красноярска. Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Биология». 2021; 14: 208–237. DOI: 10.17516/1997–1389–0331.

13. Минченок Е. Е., Пахомова Н. А. Оценка состояния городских водных экосистем гидробиологическим показателям. Теоретическая и прикладная экология. 2016; 3: 48–55.

14. Дочкина Ю. Н., Корчагин В. И. Особенности биологической очистки высококонцентрированных стоков, прошедших электрофлотационную обработку. Материалы LIX отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2020 год. Воронеж, 2021. С. 113.

15. Balku Ş. Influence of temperature on activated sludge systems. Celal Bayar University Journal of Science. 2018; 14: 77–80. DOI: 10.18466/cbayarfbe.357348.

16. Кулишов С. А., Лыков И. Н., Голофтеева А. С. Исследование технологических параметров очистки сточных вод прикрепленным биоценозом. Общественно-научный журнал «Проблемы региональной экологии». 2016; 4: 16–20.

17. Ха Куан Чан, Гогина Е. С. Влияние технологических параметров работы реактора периодического действия на эффективность процесса глубокой очистки сточных вод от соединений азота. Строительство: Наука и образование. 2020; 2: 1–18. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.5.

18. Брикова О. И., Душин С. Е. Исследование влияния температуры среды на биологические процессы в моделях типа ASM1. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019; 5: 25–31.

19. Шевцов В. С. Влияние температуры воды на технологические параметры работы осветлителя со взвешенным слоем активного ила. Строительство в прибрежных курортных регионах : Материалы X международной научно-практической конференции, 21-25 мая 2018 г. Сочи, 2018. С. 280–284.

References

1. On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2019 : State report. - Moscow : Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2020. - 1000 p. (In Russian).

2. Korchagin V. I., Dochkina Yu. N., Popova L. V., Denisova-Barabash E. A. Extraction nutrient substrate from highly concentrated poultry processing plants effluents. Earth and environmental science. 2020. EESE6402062. DOI: 10.1088/1755-1315/640/2/022062.

3. Ashurbekova T. N., Isaeva N. G., Murzaeva A. N. *Sravnitel'nyj analiz kachestva artezianskih vod* [Comparative analysis of the quality of artesian waters]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2018, no. 3, pp. 40-47. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-040-047.

4. Babushkina Yu. A., Nazarenko N. N. *Migraciya pollyutantov i zagryaznenie podzemnyh vod pri dobyche zheleznyh rud* [Migration of pollutants and groundwater pollution during iron ore mining]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2018, no. 3, pp. 50-61. DOI: 10.25750/1995-4301-2018-3-055-061.

5. Dochkina Yu. N., Studenikina L. N., Korchagin V. I. *Vliyanie prirody pitatel'nogo substrata na gidrobiologicheskie i gidrohimicheskie pokazateli aktivnogo ila* [The influence of the nature of the nutrient substrate on the hydrobiological and hydrochemical parameters of activated sludge]. *Materialy LVII otchetnoj nauchnoj konferencii prepodavatelej i nauchnyh sotrudnikov VGUIT za 2018 god* [Materials of the LVII reporting scientific conference of VSUIT teachers and researchers for 2018], 2019, pp. 106.

6. Dovgal' I. V., Sergeeva N. G. *Cidyachie infuzorii (Ciliophora) iz ekstremal'nyh mestoobitanij* [Sessile infusoria (Ciliophora) from extreme habitats]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya «Biologiya»* [Journal of the Siberian Federal University. Series "Biology"], 2016, no. 4, pp. 385-397. DOI: 10.17516/1997-1389-2016-9-4-385-397.

7. Weirich C. E., Feiden A., Souza C. S. [et al.] (2021) Temperature influences swine wastewater treatment by aquatic plants. *Scientia Agricola*, no. 78, pp. 1-7. DOI: 10.1590 / 1678-992X-2019-0325.

8. Liu K., Hang Q., Yuan Q. [et al.] (2016) Influence of temperature on MBBR denitrification for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent. *Research of Environmental Scien*ces, no. 29 (06), pp. 877-886. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.06.12.

9. Zhou X., Bolun L., Jun W. (2021) Temperature influenced the comammox community composition in drinking water and wastewater treatment plants. *Microbial ecology*, no. 82, pp. 870-884. DOI: 10.1007/s00248-021-01724-9.

10. Daud M., Hina R., Muhammad A. [et al.] (2018) Review of upflow anaerobic sludge blanket reactor technology: effect of different parameters and developments for domestic wastewater treatment. *Journal of Chemistry*, no. 3, pp. 1-13. DOI: 10.1155/2018/1596319.

11. Cho S., Cicilia K., Nguyen V. (2020) Performance of anammox processes for wastewater treatment: a critical review on effects of operational conditions and environmental stresse. *Water*, no. 12(1), pp. 20. DOI: 10.3390/w12010020.

12. Kravchuk E. S., Dubovskaya O. P., Shulepina S. P. i dr. *Vliyanie antropogennyh faktorov na ekosistemu protoki r. Enisej v cherte goroda Krasnoyarska* [The influence of anthropogenic factors on the ecosystem of the river channels. Yenisei in the city of Krasnoyarsk]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya «Biologiya»* [Journal of the Siberian Federal University. Series "Biology"], 2021, no. 14, pp. 208-237. DOI: 10.17516/1997–1389–0331.

13. Minchenok E. E., Pahomova N. A. *Ocenka sostoyaniya gorodskih vodnyh ekosistem gidrobiologicheskim pokazatelyam* [Assessment of the state of urban aquatic ecosystems by hydrobiological indicators]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2016, no. 3, pp. 48-55.

14. Dochkina Yu. N., Korchagin V. I. *Osobennosti biologicheskoj ochistki vysokokoncentrirovannyh stokov, proshedshih elektroflotacionnuyu obrabotku* [Features of biological purification of highly concentrated effluents that have undergone electroflotation treatment]. *Materialy LIX otchetnoj nauchnoj konferencii prepodavatelej i nauchnyh sotrudnikov VGUIT za 2020 god* [Materials of the LIX reporting scientific conference of VSUIT teachers and researchers for 2020], 2021, pp. 113.

15. Balku Ş. (2018) Influence of temperature on activated sludge systems. *Celal Bayar University Journal of Science*, no. 14, pp. 77-80. DOI: 10.18466/cbayarfbe.357348.

16. Kulishov S. A., Lykov I. N., Golofteeva A. S. *Issledovanie tekhnologicheskih parametrov ochistki stochnyh vod prikreplennym biocenozom* [Investigation of technological parameters of wastewater treatment with attached biocenosis]. *Obshchestvenno-nauchnyj zhurnal «Problemy regional'noj ekologii»* [Socio-scientific journal "Problems of regional ecology"], 2016, no. 4, pp. 16-20.

17. Ha Kuan Chan, Gogina E. S. *Vliyanie tekhnologicheskih parametrov raboty reaktora periodicheskogo dejstviya na effektivnost' processa glubokoj ochistki stochnyh vod ot soedinenij azota* [The influence of technological parameters of the periodic reactor operation on the efficiency of the process of deep wastewater treatment from nitrogen compounds]. *Stroitel'stvo: Nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education], 2020, no. 2, pp. 1-18. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.2.5.

18. Brikova O. I., Dushin S. E. *Issledovanie vliyaniya temperatury sredy na biologicheskie processy v modelyah tipa ASM1* [Investigation of the influence of ambient temperature on biological processes in ASM1-type models]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestiya SPbGETU "LETI"], 2019, no. 5, pp. 25-31.

19. Shevcov V. S. *Vliyanie temperatury vody na tekhnologicheskie parametry raboty osvetlitelya so vzveshennym sloem aktivnogo ila* [The influence of water temperature on the technological parameters of the clarifier with a suspended layer of activated sludge]. *Stroitel'stvo v pribrezhnyh kurortnyh regionah : Materialy X mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, 21 – 25 maya 2018 g* [Construction in coastal resort regions : Materials of the X International Scientific and Practical Conference, May 21-25, 2018], 2018, pp. 280-284.

Сведения об авторах

✉ *Дочкина Юлия Николаевна* – ведущий инженер лаборатории промышленной экологии и промышленной безопасности, старший преподаватель кафедры промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», пр. Революции, 19, г. Воронеж, Российская Федерация, 394036, ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-9113-1564, e-mail: dochkina.j.n@yandex.ru.

Корчагин Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», пр. Революции, 19, г. Воронеж, Российская Федерация, 394036, ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-7212-1627, e-mail: kvi-vgta@rambler.ru.

Плякина Алина Анатольевна – студентка кафедры промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», пр. Революции, 19, г. Воронеж, Российская Федерация, 394036, ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-7848-2685, e-mail: alina.plyakina7@gmail.com.

Information about the authors

✉ *Yulia N. Dochkina* – leading engineer of the laboratory of industrial ecology and industrial safety, senior lecturer of the department of industrial ecology, equipment of chemical and petrochemical industries, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, Russian Federation, 394036, ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-9113-1564, e-mail: dochkina.j.n@yandex.ru.

Vladimir I. Korchagin – Doctor of technical sciences, Professor, head of the department of industrial ecology, equipment of chemical and petrochemical industries, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, Russian Federation, 394036, ORCID: http://orcid.org / 0000-0001-7212-1627, e-mail: kvi-vgta@rambler.ru .

Alina A. Plyakina – student of the department of industrial ecology, equipment of chemical and petrochemical industries, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, Russian Federation, 394036, ORCID: http://orcid.org / 0000-0001-7848-2685, e-mail: alina.plyakina7@gmail.com.

✉ – Для контактов/Corresponding author

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/4

УДК 628.355.2

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ БИОЦЕНОЗА АКТИВНОГО ИЛА ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ В СРЕДЕ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ БЕЛКОВО-ЛИПИДНОГО КОМПОНЕНТА

Юлия Н. Дочкина[1] ✉, dochkina.j.n@yandex.ru, 0000-0001-9113-1564
Алина А. Плякина[1], alina.plyakina7@gmail.com, 0000-0001-7848-2685
Владимир И. Корчагин[1], kvi-vgta@rambler.ru, 0000-0001-7212-1627

[1]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», пр. Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия*

Изучение влияния белково-липидных компонентов на показатели жизнедеятельности активного ила является перспективным с позиции выработки рекомендаций по предварительной очистке высококонцентрированных стоков, поступающих на линию биологического окисления. Объекты исследования: 1. Активный ил (иловый индекс 92,0-125,0 см^3/г; массовая концентрация 4,0-5,5 г/дм^3; скорость оседания 0,5-0,6 см^3/мин), 2. Пептон сухой ферментативный для бактериологических целей (ГОСТ 13805-76). Методы исследования: ФР 1.31.2008.04397, ФР 1.31.2008.04398, ФР 1.31.2008.04400, микроскопирование образцов с целью гидробиологического исследования, лабораторная установка, включающая емкость для дозирования сточной воды, аэротенк – смеситель, емкость для отстаивания избыточного активного ила, компрессор. Условия, при которых осуществляли биоокисление, следующие: скорость подачи стока в аэротенк 0,5 дм^3/час, расход воздуха на аэрацию одного аэротенка 2 дм^3/мин, режим работы непрерывный, аэрация мелкопузырчатая, равномерная, интенсивная, время проведения исследования 5 недель. Изучение влияния содержания белково-липидного компонента в стоках на основные гидрохимические и гидробиологические показатели состояния биоценоза активного ила проводили с использованием модельной сточной воды с содержанием пептона ферментативного С = 500 мг/дм^3, С = 1000 мг/дм^3, С = 2000 мг/дм^3, С = 3000 мг/дм^3, С = 4000 мг/дм^3. Полученные данные свидетельствуют о необратимом негативном влиянии на гидрохимические и гидробиологические показатели биоценоза активного ила стока с содержанием белково-липидного компонента 3000 мг/дм^3 и более. Однако, при содержании белково-липидного компонента менее 1000 мг/дм^3 наблюдается стабильная динамика как по гидрохимическим, так и по гидробиологическим показателям.

Ключевые слова: активный ил, биоценоз, белки, жиры, белково-липидный компонент

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Дочкина Ю.Н. Оценка состояния биоценоза активного ила при функционировании в среде с высоким содержанием белково-липидного компонента / Ю.Н. Дочкина, В.И. Корчагин, А.А. Плякина // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 43–56. – *Библиогр.: с. 51–55 (29 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/4.

Поступила: 08.11.2021 ***Принята к публикации***: 27.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

ASSESSMENT OF THE STATE OF THE ACTIVATED SLUDGE BIOCENOSIS WHEN FUNCTIONING IN AN ENVIRONMENT WITH A HIGH CONTENT OF PROTEIN-LIPID COMPONENT

Yulia N Dochkina[1] ✉, dochkina.j.n@yandex.ru, 0000-0001-9113-1564
Alina A Plyakina[1], alina.plyakina7@gmail.com, 0000-0001-7848-2685
Vladimir I Korchagin[1], kvi-vgta@rambler.ru, 0000-0001-7212-1627

[1] *FSBEI HE Voronezh State University of Engineering Technologies, 394036, 19 Revolyutsii Ave., Voronezh, Russia*

Abstract

The study of the effect of protein-lipid components on the vital functions of activated sludge is promising from the standpoint of developing recommendations for preliminary treatment of highly concentrated effluents entering the biological oxidation line. Objects of research: 1. Active sludge (sludge index 92.0-125.0 cm^3/g; mass concentration 4.0-5.5 g/dm^3; sedimentation rate 0.5-0.6 cm^3/min), 2. Enzymatic dry peptone for bacteriological purposes (13805-76 State Standard). Research methods: FR 1.31.2008.04397, FR 1.31.2008.04398, FR 1.31.2008.04400, microscopic examination of specimens for the purpose of hydrobiological research, laboratory installation, including a container for dosing waste water, aeration tank - mixer, a container for settling excess activated sludge, a compressor. The conditions under which the biooxidation was carried out were as follows: the flow rate into the aeration tank was 0.5 dm3/h, the air consumption for aeration of one aeration tank was 2 dm^3/min, the operating mode was continuous, the aeration was fine-bubble, uniform, intensive, the study time was 5 weeks. The study of the effect of the content of the protein-lipid component in the effluents on the main hydrochemical and hydrobiological indicators of the state of the activated sludge biocenosis was carried out using model waste water containing enzymatic peptone C = 500 mg/dm^3, C = 1000 mg/dm^3, C = 2000 mg/dm^3, C = 3000 mg/dm^3, C = 4000 mg/dm^3. The data obtained indicate an irreversible negative effect on the hydrochemical and hydrobiological parameters of activated sludge biocenosis with a protein-lipid component content of 3000 mg/dm^3 and more. However, when the content of the protein-lipid component is less than 1000 mg/dm^3, stable dynamics is observed both in hydrochemical and hydrobiological indicators.

Keywords: activated sludge, biocenosis, proteins, fats, protein-lipid component

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

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

***For citation*:** Dochkina J.N., Korchagin V.I., Plyakina A.A. (2021) Assessment of the state of active sludge biocenosis when functioning in an environment with a high content of protein-lipid component. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (4), pp. 43-56 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/4.

Received: 08.11.2021 ***Revised***: 03.12.2021 ***Accepted***: 27.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

В настоящее время достаточно остро стоит вопрос антропогенного загрязнения водных объектов, важнейших компонентов окружающей природной среды, поллютантами недостаточно очищенных производственных и бытовых сточных вод [1]. Эффективность очистки стоков на технологической линии обезвреживания преимущественно зависит от работы блока биохимического окисления, однако, загрязнители, содержащиеся в сточных водах в высоких концентрациях, способны частично «проскакивать» в поверхностные водные объекты, приводя к их деградации [2].

Производственные сточные воды являются многокомпонентной системой непостоянного качественно-количественного состава [3], а сточные воды предприятий пищевой отрасли являются в свою очередь, высококонцентри-рованными и требуют дополнительной обработки [4].

В настоящее время применяются различные способы снижения содержания поллютантов в производственных стоках: реагентная обработка под ультразвуком [5], обработка бинарными системами (коагулянт + флокулянт) [6], очистка электрокоагуляционными методами [7], различные способы обработки в электрических полях [8], электрофлотация [9], ультразвуковая кавитация [10], сорбция с использованием различных сорбентов, в том числе цеолитов [11], адсорбция [12-14], флотация с использованием флотокомбайнов [15], пневмосепарация с использованием гумата калия [16], различные металлоорганические каркасные соединения [17], комбинированные методы типа: напорная флотация или электрофлотация совместно с анаэробно - аэробным обезвреживанием» [18], коагуляция с использованием в качестве реагента промышленных отходов [19], внедрение микроводорослей [20].

Производственный сток предприятий по переработке птицы содержит кровь, жиры, белки, углеводы, частицы мяса, кожи, перья. Кроме того, в воде присутствуют неорганические вещества, грязь и песок. Концентрация загрязнителей может достигать по показателям БПК и ХПК до 5100 мг/дм^3 и до 12500 мгO_2/дм^3 соответственно, по взвешенным веществам до 12000 мг/дм^3 [2].

На сегодняшний день проблема очистки жиро- и белоксодержащих сточных вод стоит достаточно остро и активно изучается за рубежом [21-25]. В свою очередь биологическая очистка возможна только для сточных вод, загрязненных веществами, которые могут быть окислены биоценозом активного ила – сообществом водорослей, беспозвоночных микроорганизмов различных систематических групп [26].

Как показывает практика, для того, чтобы эффективно извлечь белково-липидные компоненты из высококонцентрированных стоков на предшествующих биологической очистке стадиях зачастую требуется добавление различных реагентов, изменяющих химический состав стоков или их pH [27], соответственно приводя к вторичному загрязнению, что влечет за собой необходимость дополнительной обработки сточных вод перед их сбросом в поверхностный водный объект или в централизованную канализационную сеть.

Широко используемый в настоящее время способ обработки сточных вод на птицеперерабатывающих предприятиях напорной флотацией не позволяет снизить содержание загрязнителей до допустимых значений, и недостаточно очищенный сток, поступая на линию биоокисления, приводит к критическому снижению основных гидрохимических и гидробиологических показателей жизнедеятельности активного ила [28].

Однако, представленные исследования позволяют полагать, что извлеченные безреагентным способом белково-липидные компоненты высококонцентрированных стоков могут быть в дальнейшем использованы в области биологической очистки сточных вод в качестве питательного субстрата для биоценоза активного ила, испытывающего голод в обедненном стоке малочисленных населенных пунктов [29].

Таким образом, изучение влияния белково-липидных компонентов на показатели жизнедеятельности активного ила является перспективным как с позиции выработки рекомендаций по предварительной очистке высококонцентрированных стоков, так и с позиции их дальнейшего использования в качестве подкормки.

Материалы и методы

Объекты исследования

1. Активный ил очистных сооружений г. Воронежа. Гидрохимические показатели исходного активного ила: иловый индекс 92,0-125,0 см^3/г; массовая концентрация 4,0-5,5 г/дм^3; скорость оседания 0,5-0,6 см^3/мин; надиловая вода прозрачная; хлопок плотный, компактный, гранулообразный.

Гидробиологические показатели представлены в таблице 1 с учетом следующей шкалы встречаемости: 1 – единичные представители, 2 - малочисленны, 3 – среднечисленны, 4 – многочисленны.

Микрофотографии проб исходного активного ила представлены на рис. 1.

Таблица 1

Гидробиологические показатели активного ила

Table 1

Hydrobiological indicators of active sludge

Укрупненные индикаторные группы Enlarged indicator groups	Балл встречаемости Conditional occurrence score
Euglypha	3-4
Kinetophragminophora	3-4
Spirotrihida	3-4
Peritricha	3-4
Rotifera (Rotaria, Philodina, Cephalodella)	3-4
Testacealobsia	3-4
Zoogloea ramigera	2-3
Gymnamoebia	1-2
Phytomastigophorea	1-2

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

2. Пептон сухой ферментативный для бактериологических целей (ГОСТ 13805-76) получаемый из рубцов и летошки крупного рогатого скота, овец, коз, а также желудков свиней с использованием слизистой оболочки желудков и поджелудочной железы. Является источником белково-липидного компонента.

Методы исследования

1. Изучение гидрохимических показателей активного ила осуществляли по комплекту методик: «Определение массовой концентрации активного ила, илового индекса, прозрачности надиловой воды» ФР 1.31.2008.04397, ФР 1.31.2008.04398, ФР 1.31.2008.04400.

2. Гидробиологические показатели активного ила определяли посредством микроскопирования электронным микроскопом Livenhuk G670T с использованием определителя видового разнообразия микроорганизмов.

3. Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, моделирующей работу проточного аэротенка-вытеснителя, представленной на рисунке 2.

4. Лабораторная установка включает в себя емкость для дозирования сточной воды, аэротенк – смеситель, емкость для отстаивания избыточного активного ила, компрессор.

5. Условия, при которых осуществляли биоокисление, следующие: скорость подачи стока в аэротенк 0,5 дм3/ч, расход воздуха на аэрацию одного аэротенка 2 дм3/мин, режим работы непрерывный, аэрация мелкопузырчатая, равномерная, интенсивная, время проведения исследования 5 недель, количество параллельных опытов на каждое значение концентрации белково-липидного компонента – 3.

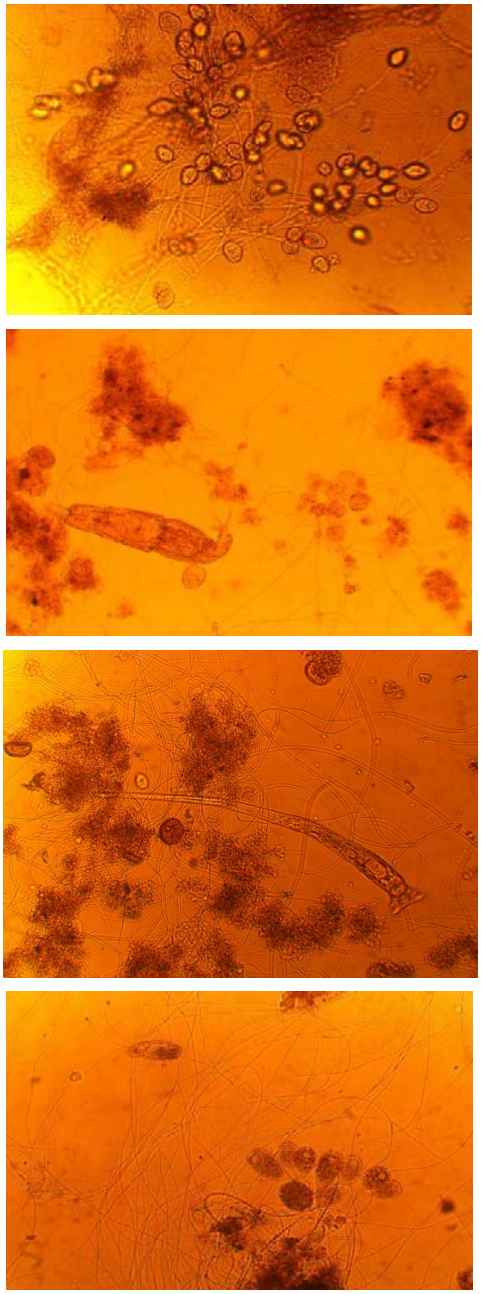


Рисунок 1. Микрофотографии исходного активного ила

Figure 1. Micrographs of the initial active sludge

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

Рисунок 2. Экспериментальная установка

Figure 2. Experimental setup

Источник: собственная композиция авторов

Source: authors' composition

Результаты и обсуждение

Изучение влияния концентрации белково-липидного компонента в стоках на основные гидрохимические и гидробиологические показатели состояния биоценоза активного ила проводили с использованием модельной сточной воды с содержанием пептона ферментативного С = 500 мг/дм^3, С = 1000 мг/дм^3, С = 2000 мг/дм^3, С = 3000 мг/дм^3, С = 4000 мг/дм^3.

Результаты, полученные по истечении 5 недель экспериментальных исследований, представлены в табл. 2. Графическое отображение динамики основных гидрохимических показателей состояния биоценоза активного ила: массовой концентрации, илового индекса и скорости оседания представлены на рис. 3, на рис. 4 представлена визуализация полученных данных в виде статических диаграмм и таблиц расчетных значений. Микрофотографии образцов активного ила, осуществлявшего очистку сточных вод с содержанием белково-липидного компонента С = 500 мг/дм^3, С = 1000 мг/дм^3, С = 2000 мг/дм^3, С = 3000 мг/дм^3, С = 4000 мг/дм^3, представлены на рис. 5.

Таблица 2

Гидрохимические показатели активного ила при биологической очистке белково-липидного стока

Table 2

Hydrochemical parameters of active sludge in the biological treatment of protein-lipid wastewater

Показатель Indicator	Концентрация пептона, С, мг/дм^3 Peptone concentration, C, mg/dm^3				
	500,0	1000,0	2000,0	3000,0	4000,0
Иловый индекс, см^3/г Silt index, cm^3/g	78,18	135,1	462,5	212	48,2
Массовая концентрация, г/дм^3 Mass concentration, g/dm^3	3,76	2,66	1,16	0,92	0,28
Скорость оседания, см^3/мин Settling rate, cm^3/min	0,63	0,53	0,16	0,71	0,82
Прозрачность надиловой воды Water transparency	прозрачная transparent		мутная muddy		
Хлопок Accumulation	крупный, компактный large, compact		средний, компактный medium, compact		диспергированный separated

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

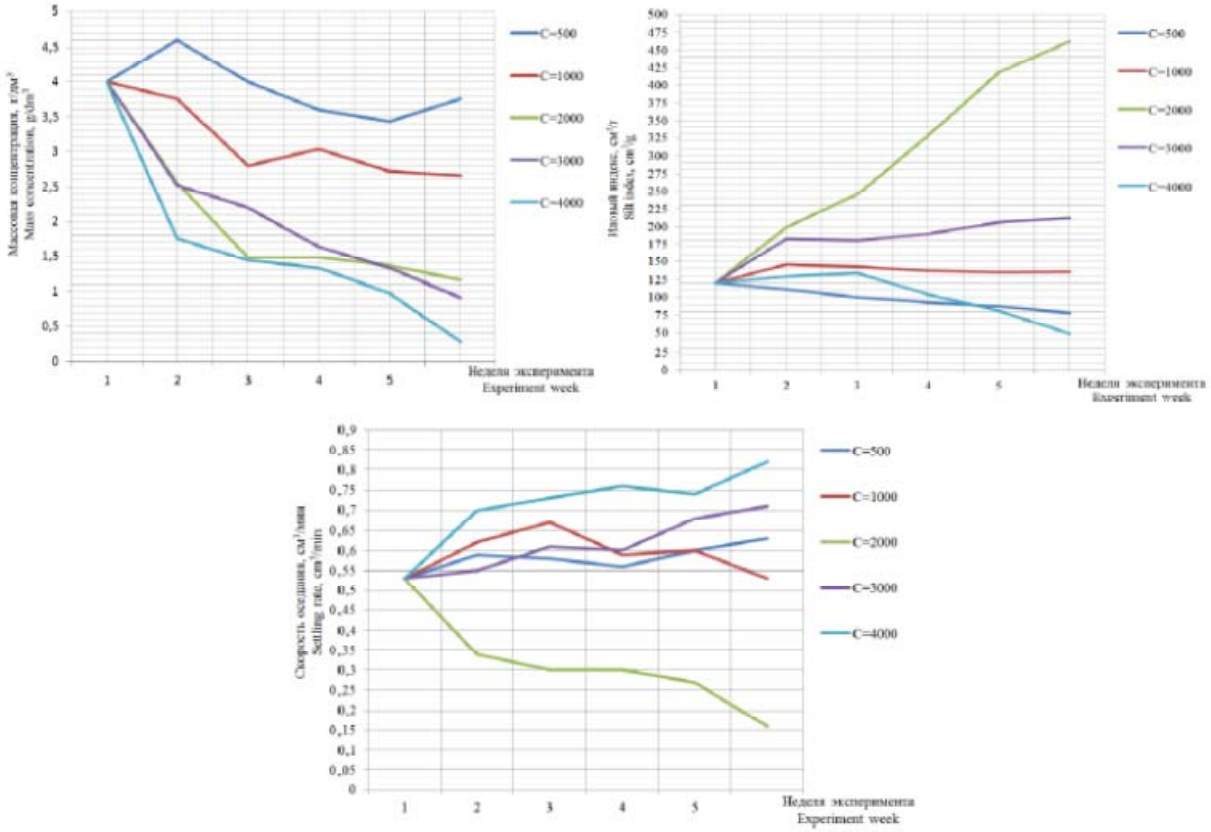
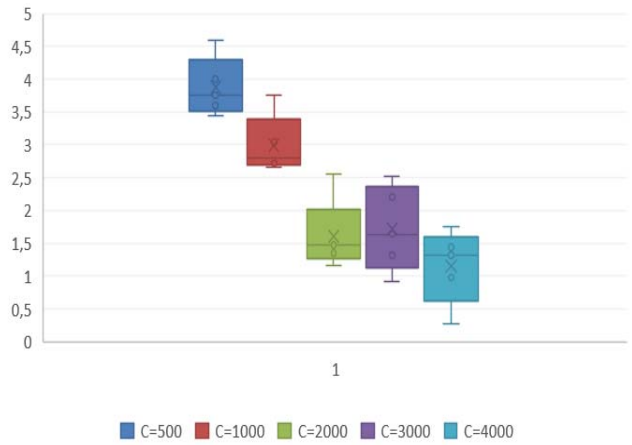


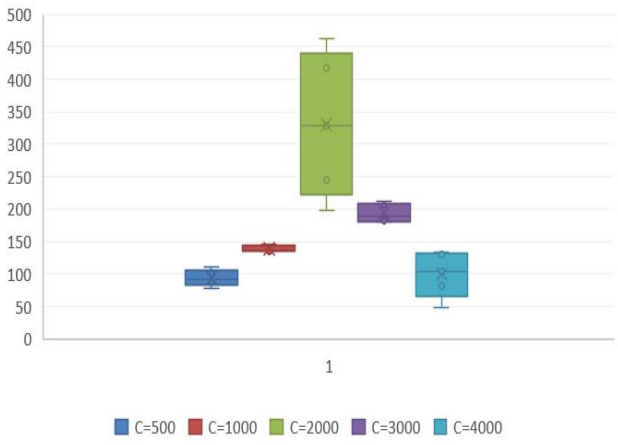
Рисунок 3. Динамика гидрохимических показателей при очистке стоков с различной концентрацией пептона

Figure 3. Dynamics of hydrochemical parameters during wastewater treatment with different concentrations of peptone

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data



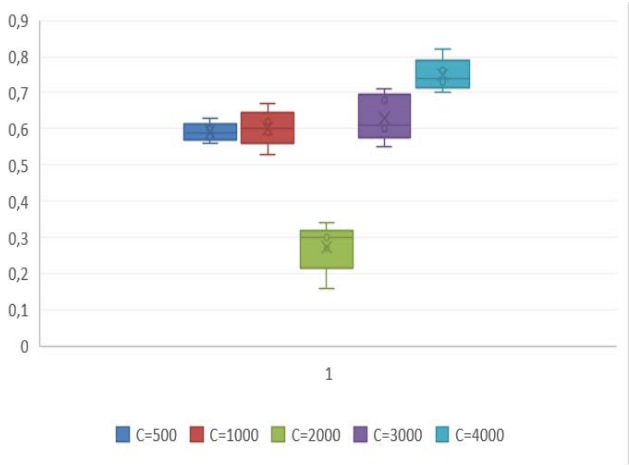


значение value	C=500	C=1000	C=2000	C=3000	C=4000
min	3,44	2,66	1,16	0,92	0,28
Q_1	3,6	2,72	1,36	1,32	0,28
Me	3,76	2,8	1,48	1,64	0,32
Q_3	4	3,04	1,48	2,2	0,44
max	4,6	3,76	2,56	2,52	0,76

а) совокупность данных по массовой концентрации
a) a set of data on mass concentration

значение value	C=500	C=1000	C=2000	C=3000	C=4000
min	78,18	134,9	198,7	180,1	48,2
Q_1	87,4	135,1	245,2	182,5	81,4
Me	92,5	137,2	328,1	189,4	103,6
Q_3	100,1	142,7	417,8	205,8	129,5
max	110,6	145,2	462,5	212	134,1

б) совокупность данных по иловому индексу
b) the set of data on the silt index



значение value	C=500	C=1000	C=2000	C=3000	C=4000
min	0,56	0,53	0,16	0,55	0,7
Q_1	0,58	0,59	0,27	0,6	0,73
Me	0,59	0,6	0,3	0,61	0,74
Q_3	0,6	0,62	0,3	0,68	0,76
max	0,63	0,67	0,34	0,71	0,82

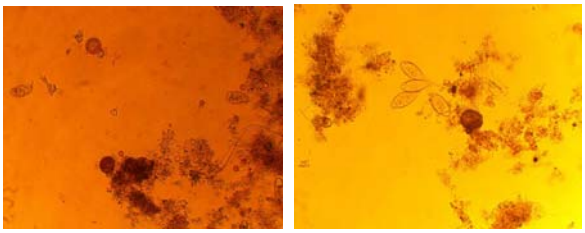
с) совокупность данных по скорости оседания
c) a set of data on the Settling rate

Рисунок 4.Статистические диаграммы

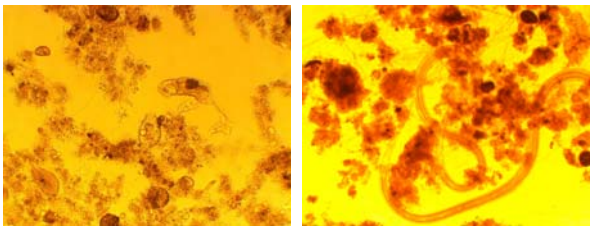
Figure 4. Statistical charts

Источник: собственные экспериментальные данные

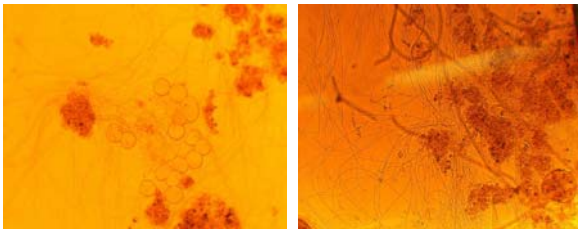
Source: own experimental data



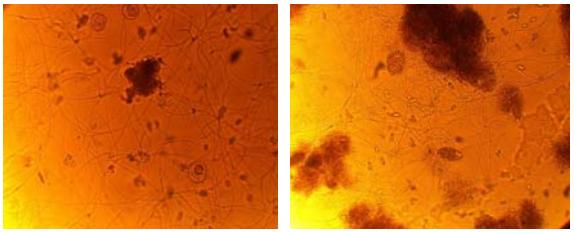
C = 500 мг/дм^3



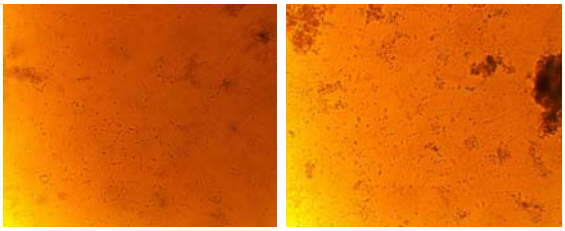
C = 1000 мг/дм^3



C = 2000 мг/дм^3



C = 3000 мг/дм^3



C = 4000 мг/дм^3

Рисунок 5. Микрофотографии проб активного ила при очистке стоков с различной концентрацией пептона

Figure 5. Micrographs of active sludge samples with different concentrations of peptone

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

По результатам анализа полученных экспериментальных данных влияния белково-липидного компонента сточных вод на состояние биоценоза активного ила, а также статистических диаграмм, можно заключить следующее.

1. Воздействие на активный ил сточных вод с содержанием пептона С = 500 мг/дм^3.

Значения массовой концентрации, илового индекса и скорости оседания на протяжении эксперимента не выходили за пределы допустимых значений. Стоит отметить, что значение илового индекса существенно снизилось, до величины 78,18 см^3/г относительно исходного образца. Видовое разнообразие образцов биоценоза преимущественно представлено различными прикрепленными инфузориями *Peritricha*, активными коловратками *Cephalodella*, *Lepadella*, *Rotaria, Philodina,* филозей *Euglypha,* водорослями *Algae*, *Zoogloea ramigera*, голыми амебами *Gymnamoebia,* инфузориями *Spirotrihida, Trochilia, Chilodonella, Colpidium*, *Colpoda, Nematoda Monhystera*.

2. Воздействие на активный ил сточных вод с содержанием пептона С = 1000 мг/дм^3.

Аналогично предыдущему образцу гидрохимические показатели находились в допустимых пределах, однако, наблюдались значения илового индекса гораздо выше первоначальных – до 135,1 см^3/г.

В результате микроскопирования установлено присутствие в пробах живых и активных коловраток *Lecane, Rotaria, Lepadella*, инфузорий *Peritricha*, *Chilodonella, Colpidium, Trachelius, Loxodes*, *Spirotrihida, Litonotus, Trochilia,* голых амеб *Gymnamoebia, Zoogloea ramigera,* филозей *Euglypha,* мицеллий грибов, *Nematoda Monhystera.*

3. Воздействие на активный ил сточных вод с содержанием пептона С = 2000 мг/дм^3.

В исследуемых образцах наблюдается экстремальное снижение массовой концентрации до 1,16 г/дм^3, а также резкое возрастание илового индекса и снижение скорости оседания, что свидетельствует о начале необратимых изменений в биоценозе и вспухании активного ила.

Гидробиологическое исследование показало, что в образцах присутствует заметное количество нитчатых бактерий, *Zoogloea ramigera* и инфузорий *Colpidium*. Также в пробах встречаются инфузории

Peritricha, неподвижные коловратки *Rotaria, Lepadella*, инфузории *Spirotrihida.*

4. Воздействие на активный ил сточных вод с содержанием пептона С = 3000 мг/дм^3 и С = 4000 мг/дм^3.

В обоих образцах устойчиво снижается массовая концентрация до критических значений (ниже 1,0 г/дм^3) и соотносимо повышается скорость оседания. Однако, в образце с концентрацией 3000 мг/дм^3 иловый индекс повышается, что свидетельствует о процессах вспухания, а в образце с концентрацией 4000 мг/дм^3 иловый индекс устойчиво снижается, что говорит об утяжелении бактериального хлопка и его минерализации, ввиду воздействия высоких концентраций органического вещества.

Видовое разнообразие образца с концентрацией 3000 мг/дм^3 сводится к малочисленным *Zoogloea ramigera* и нитчатым бактериям, и многочисленным особям инфузорий *Colpidium* – характерном обитателе перегруженного активного ила.

Гидробиологические показатели образца с концентрацией 4000 мг/дм^3 определяются практически 100 % представителями инфузорий *Colpidium* и отсутствием других особей биоценоза активного ила.

Выводы

Полученные данные свидетельствуют о необратимом негативном влиянии на гидрохимические и гидробиологические показатели биоценоза активного ила стока с концентрацией белково-липидного компонента 3000 мг/дм^3 и более.

Однако при концентрациях белково-липидного компонента не более 1000 мг/дм^3 наблюдается стабильная динамика как по гидрохимическим, так и по гидробиологическим показателям, следовательно, можно заключить, что максимальной рабочей концентрацией белково-липидных соединений в сточных водах является 1000 мг/дм^3, а кратковременное повышение до 2000 мг/дм^3 не приведет к значимым негативным последствиям.

Список литературы

1. Носкова Т. В., Панина М. С., Лабузова О. М. (и др.) Оценка антропогенной нагрузки на водные объекты в городской черте. Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 98–103. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-3-098-103.

2. Корчагин В. И., Дочкина Ю. Н., Денисова-Барабаш Е. А., Плякина А. А. Сравнительная оценка эффективности коагуляционных методов при извлечении биологически активных компонентов из высококонцентрированных стоков. Вестник ВГУИТ. 2020. № 1. С. 213–218. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-1-213-218.

3. Шлёкова, И. Ю., Кныш А. И. Повышение эффективности аэробной биологической очистки нефтесодержащих сточных вод. Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 203–209. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209.

4. Поливанова Т. В., Чернышев М. А., Григорьева Е. В. Оптимизация технологии очистки сточных вод животноводческих комплексов. Юность и Знания – Гарантия Успеха. Курск, 2017. С. 64–68.

5. Savchuk L., Znak Z., Kurylets O. [et al.] Research into processes of wastewater treatment at plants of meat processing industry by flotation and coagulation. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2017. Vol. 3. P. 4–9. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101736.

6. Makhlay, K., Tseitlin M., Raiko V. A study of wastewater treatment conditions for the poultry meat processing enter. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2018. Vol. 3. P. 15–20. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.131122.

7. Mervat A. Sadik. Removal of reactive dye from textile mill wastewater by leading electro-coagulation process using aluminum as a sacrificial anode. Scientific research publishing. 2019. Vol. 9. P. 182–193. DOI:10.4236/aces.2019.92014.

8. Ghernaout D., Elboughdir N. Electrochemical technology for wastewater treatment: dares and trends / D. Ghernaout. Open access library journal. 2020. Vol. 7. P. 1–17. DOI: 10.4236/oalib.1106020.

9. Korchagin V. I., Dochkina Yu. N., Popova L. V., Denisova-Barabash E. A. Extraction nutrient substrate from highly concentrated poultry processing plants effluents. Earth and environmental science. 2020. EESE6402062. DOI: 10.1088/1755-1315/640/2/022062.

10. Сагитов Р. Ф., Коротков В. Г., Быков А. В. и др. Электрофизический способ очистки сточных вод дрожжевых и хлебопекарных предприятий. Экология и промышленность России. 2017. № 9. С. 48–52. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-9-48-52.

11. Обуздина М. В., Руш Е. А., Шалунц Л. В. Решение экологических проблем очистки сточных вод путем создания сорбента на основе цеолита. Экология и промышленность России. 2017. № 8. С. 20–25. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-8-20-25.

12. Краснова, Т. А. Адсорбционные технологии очистки воды при производстве фруктово-сывороточных напитков / Т. А. Краснова, И. В. Тимощук, А. К. Горелкина и др. // Экология и промышленность России. – 2018. – № 10. – С. 4–10. – DOI: 10.18412/1816-0395-2018-10-4-10.

13. Краснова Т. А., Горелкина А. К., Кирсанов М. П. Использование адсорбции для снижения загрязнения водных ресурсов. Экология и промышленность России. 2018. № 1. С. 44–49. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-44-49.

14. Шлёкова И. Ю., Кныш А. И. Интенсификация биологической очистки производственных сточных вод в аэротенках с помощью адсорбентов. Экология и промышленность России. 2018. № 6. С. 20–25. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-20-25.

15. Ксенофонтов Б. С., Козодаев А. С., Таранов Р. А. и др. Физико-химическая очистка сточных вод от сложных органических веществ с использованием флотокомбайнов. Экология и промышленность России. 2019. № 12. С. 4–8. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-12-4-8.

16. Гальченко С. В., Воробьева Е. В., Чердакова А. С. Экологические аспекты очистки сточных вод от нефтепродуктов методом пневмосепарации при внесении гумата калия. Экология и промышленность России. 2018. № 1. С. 38–43. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-38-43.

17. Власова Е. А., Кулешова Н. К., Афанасьева А. В. Применение каркасных соединений для очистки окрашенных сточных вод пищевых производств. Экология и промышленность России. 2019. № 1. С. 15–19. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-15-19.

18. Зубарева Г. И. Глубокая очистка сточных вод с чрезмерно высоким содержанием жира. Экология и промышленность России. 2019. № 10. С. 34–38. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-34-38.

19. Суханов Е. В., Сапронова Ж. А., Свергузова С. В. и др. Некоторые особенности коагуляционной очистки воды с помощью пыли электросталеплавильного производства. Экология и промышленность России. 2017. № 1. С. 24–29. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-1-24-29.

20. Зибарев Н. В., Жажков В. В., Адрианова М. Ю. и др. Комплексное использование микроводорослей в очистке сточных вод и переработке отходов пищевой промышленности. Экология и промышленность России. 2021. № 11. С. 18–23. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-11.

21. Bingo M. N., Njoya M., Basitere M. [et al.] Performance evaluation of an integrated multi-stage poultry slaughterhouse wastewater treatment system. Journal of water process engineering. 2021. Vol. 43. P. 102309. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102309.

22. Njoya M., Basitere M., Karabo Obed Ntwampe S. Performance evaluation and kinetic modeling of down-flow high-rate anaerobic bioreactors for poultry slaughterhouse wastewater treatment. Environmental science and pollution research. 2020. № 28. P. 9529–9541. DOI: 10.1007/s11356-020-11397-5.

23. Ilyasov O. R., Koshelev S. N., Khomyakova V. S. [et al.] Improvement of the biotechnology of wastewater treatment from livestock and poultry farms. Chief animal technician. 2020. № 9. P. 13–19. DOI: 10.33920/sel-03-2009-02.

24. Laca A., Laca A., Diaz M. Environmental impact of poultry farming and egg production. Environmental impact of agro-food industry and food consumption. 2021. P. 81–100. DOI: 10.1016/B978-0-12-821363-6.00010-2.

25. Bingo M. N., Basitere M., Ntwampe S. K. O. Poultry slaughterhouse wastewater treatment plant design advancements. 16th South Africa int'l conference on agricultural, chemical, biological & environmental sciences (ACBES-19) Nov. 18-19. Johannesburg (S.A.), 2019. P. 289–294. DOI: 10.17758/EARES8.EAP1119145.

26. Домрачева Л. И., Скугорева С. Г., Ашихмина Т. Я. и др. Использование отработанного активного ила для очистки сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами. Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 176–184. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-4-176-184.

27. Дочкина Ю. Н., Корчагин В. И. Особенности биологической очистки высококонцентрированных стоков, прошедших электрофлотационную обработку. Материалы LIX отчетной научной конференции преподавателей и научных сотрудников ВГУИТ за 2020 год. Воронеж, 2021. С. 113.

28. Плякина А. А., Закаблукова Ю. В., Дочкина Ю. Н. Оценка состояния биоценоза активного ила при биологической очистке высококонцентрированных сточных вод. Материалы студенческой научной конференции за 2020 год. Воронеж, 2020. С. 93.

29. Плякина А. А., Дочкина Ю. Н., Корчагин В. И. Исследование гидрохимических и гидробиологических показателей биоценоза активного ила в процессе подкормки субстратом, содержащим биологически активные компоненты. Материалы студенческой научной конференции за 2021 год. Воронеж, 2021. С. 283.

References

1. Noskova T. V., Panina M. S., Labuzova O. M. [et al.] *Ocenka antropogennoj nagruzki na vodnye ob"ekty v gorodskoj cherte* [Assessment of anthropogenic load on water bodies in urban areas]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2021, no. 3, pp. 98-103. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-3-098-103.

2. Korchagin V. I., Dochkina Yu. N., Denisova-Barabash E. A., Plyakina A. A. *Sravnitel'naya ocenka effektivnosti koagulyacionnyh metodov pri izvlechenii biologicheski aktivnyh komponentov iz vysokokoncentrirovannyh stokov* [Comparative evaluation of the coagulation methods effectiveness in the extraction of biologically active components from highly concentrated effluents]. *Vestnik VGUIT* [Vestnik VSUET], 2020, no. 82, pp. 213-218. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-1-213-218.

3. Shlekova I. Yu., Knysh A. I. *Povyshenie effektivnosti aerobnoj biologicheskoj ochistki neftesoderzhashchih stochnyh vod* [Improving the efficiency of aerobic biological purification of oily wastewater]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2021, no. 1, pp. 203-209. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209.

4. Polivanova T. V., Chernyshev M. A., Grigorieva E. V. *Optimizaciya tekhnologii ochistki stochnyh vod zhivotnovodcheskih kompleksov* [Optimization of wastewater treatment technology of livestock complexes]. *Yunost' i Znaniya – Garantiya Uspekha* [Youth and Knowledge - A Guarantee of Success.], 2017, pp. 64-68.

5. Savchuk L., Znak Z., Kurylets O. [et al.] (2017) Research into processes of wastewater treatment at plants of meat processing industry by flotation and coagulation. *Eastern-European journal of enterprise technologies.* no. 3, pp. 1-7. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101736.

6. Makhlay K., Tseitlin M., Raiko V. (2018) A study of wastewater treatment conditions for the poultry meat processing enter. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. no. 3, pp. 15-20. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.131122.

7. Mervat A. Sadik. (2019) Removal of reactive dye from textile mill wastewater by leading electro-coagulation process using aluminum as a sacrificial anode. *Scientific research publishin*. no. 9, pp. 182-193. DOI:10.4236/aces.2019.92014.

8. Ghernaout D., Elboughdir N. (2020) Electrochemical technology for wastewater treatment: dares and trends. *Open access library journal*. no. 7, pp. 1-17. DOI: 10.4236/oalib.1106020.

9. Korchagin V. I., Dochkina Yu. N., Popova L. V., Denisova-Barabash E. A. (2020) Extraction nutrient substrate from highly concentrated poultry processing plants effluents. *Earth and environmental science*, EESE6402062. DOI: 10.1088/1755-1315/640/2/022062.

10. Sagitov R. F, Korotkov V. G, Bykov A. V. [et al.] *Elektrofizicheskij sposob ochistki stochnyh vod drozhzhevyh i hlebopekarnyh predpriyatij* [Electrophysical method for treatment of waste water from yeast and baking plants]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2017, no. 9, pp. 48-52. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-9-48-52.

11. Obuzdina M. V., Rush E. A., Shalunz L. V. *Reshenie ekologicheskih problem ochistki stochnyh vod putem sozdaniya sorbenta na osnove ceolita* [Solution of environmental issues of wastewater treatment by means of design of sorbent based on zeolite]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2017, no. 8, pp. 20-25. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-8-20-25.

12. Krasnova T. A., Timoshchuk I. V., Gorelkina A. K. [et al.] *Adsorbcionnye tekhnologii ochistki vody pri proizvodstve fruktovo-syvorotochnyh napitkov* [Adsorption technologies for water treatment in the production of fruit and whey drinks]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2018, no. 10, pp. 4-10. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-10-4-10.

13. Krasnova T. A., Gorelkina A. K., Kirsanov M. P. *Ispol'zovanie adsorbcii dlya snizheniya zagryazneniya vodnyh resursov* [Adsorption Use to Reduce Water Pollution]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2018, no. 1, pp. 44-49. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-44-49.

14. Shlekova I. Yu., Knysh A. I. *Intensifikaciya biologicheskoj ochistki proizvodstvennyh stochnyh vod v aerotenkah s pomoshch'yu adsorbentov* [Intensification of biological treatment of industrial wastewater in aerotanks using adsorbents]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2018, no. 6, pp. 20-25. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-20-25.

15. Ksenofontov B. S., Kozodaev A. S., Taranov R. A. [et al.] *Fiziko-himicheskaya ochistka stochnyh vod ot slozhnyh organicheskih veshchestv s ispol'zovaniem flotokombajnov* [Physico-chemical wastewater treatment from complex organic substances using flotocombs]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2019, no. 12, pp. 4-8. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-12-4-8.

16. Galchenko S. V., Vorob'eva E. V., Cherdakova A. S. *Ekologicheskie aspekty ochistki stochnyh vod ot nefteproduktov metodom pnevmoseparacii pri vnesenii gumata kaliya* [Ecological aspects of wastewater treatment from petroleum products by the method of pneumoseparation when applying humate of potassium]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2018; 1: 38-43. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-1-38-43.

17. Vlasova E. A., Kuleshova N. K., Afanas'eva A. V. *Primenenie karkasnyh soedinenij dlya ochistki okrashennyh stochnyh vod pishchevyh proizvodstv* [Application of metal-organic frameworks for purification of colored waste water of food industry]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2019, no. 1, pp. 15-19. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-15-19.

18. Zubareva G. I. *Glubokaya ochistka stochnyh vod s chrezmerno vysokim soderzhaniem zhira* [Deep wastewater treatment with excessively high fat content]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2019, no. 10, pp. 34-38. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-10-34-38.

19. Sukhanov E. V., Sapronova Zh. A., Sverguzova S. V. [et al.] *Nekotorye osobennosti koagulyacionnoj ochistki vody s pomoshch'yu pyli elektrostaleplavil'nogo proizvodstva* [Some features of the coagulation water treatment using dust of electric furnace steelmaking]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2017, no. 1, pp. 24-29. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-1-24-29.

20. Zibarev N. V., Zhazhkov V. V., Andrianova M. Yu. [et al.] Kompleksnoe ispol'zovanie mikrovodoroslej v ochistke stochnyh vod i pererabotke othodov pishchevoj promyshlennosti [Integrated use of microalgae in waste water

purification and processing of food industry waste]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2021, no. 11, pp. 18-23. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-11.

21. Bingo M. N., Njoya M., Basitere M. [et al.] (2021) Performance evaluation of an integrated multi-stage poultry slaughterhouse wastewater treatment system. *Journal of water process engineering*. no. 43, pp. 102309. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102309.

22. Njoya M., Basitere M., Karabo Obed Ntwampe S. (2020) Performance evaluation and kinetic modeling of down-flow high-rate anaerobic bioreactors for poultry slaughterhouse wastewater treatment. *Environmental science and pollution research*. no. 28, pp. 9529-9541. DOI: 10.1007/s11356-020-11397-5.

23. Ilyasov O. R., Koshelev S. N., Khomyakova V. S. [et al.] (2020) Improvement of the biotechnology of wastewater treatment from livestock and poultry farms. *Chief animal technician*. no. 9, pp. 13-19. DOI: 10.33920/sel-03-2009-02.

24. Laca A., Laca A., Diaz M. (2021) Environmental impact of poultry farming and egg production. *Environmental impact of agro-food industry and food consumption*. pp. 81-100. DOI: 10.1016/B978-0-12-821363-6.00010-2.

25. Bingo M. N., Basitere M., Ntwampe S. K. O. (2019) Poultry slaughterhouse wastewater treatment plant design advancements. *16th South Africa int'l conference on agricultural, chemical, biological & environmental sciences (ACBES-19) Nov. 18-19*. pp. 289-294. DOI: 10.17758/EARES8.EAP1119145.

26. Domracheva L. I., Skugoreva S. G., Ashikhmina T. Ya. [et al.] *Ispol'zovanie otrabotannogo aktivnogo ila dlya ochistki stochnyh vod, zagryaznennyh tyazhelymi metallami* [The use of spent activated sludge for the treatment of wastewater contaminated with heavy metals]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* [Theoretical and applied ecology], 2020, no. 4, pp. 176-184. DOI: 10.25750/1995-4301-2020-4-176-184.

27. Dochkina Yu. N., Korchagin V. I. *Osobennosti biologicheskoj ochistki vysokokoncentrirovannyh stokov, proshedshih elektroflotacionnuyu obrabotku* [Features of biological purification of highly concentrated effluents that have undergone electroflotation treatment]. *Materialy LIX otchetnoj nauchnoj konferencii prepodavatelej i nauchnyh sotrudnikov VGUIT za 2020 god* [Materials of the LIX reporting scientific conference of VSUET teachers and researchers for 2020], 2021, pp. 113.

28. Plyakina A. A., Zakablukova Yu. V., Dochkina Yu. N. *Ocenka sostoyaniya biocenoza aktivnogo ila pri biologicheskoj ochistke vysokokoncentrirovannyh stochnyh vod* [Assessment of the state of the biocenosis of activated sludge in the biological treatment of highly concentrated wastewater]. *Materialy studencheskoj nauchnoj konferencii za 2020 god* [Materials of the student scientific conference for 2020], 2020, pp. 93.

29. Plyakina A. A., Dochkina Yu. N., Korchagin V. I. *Issledovanie gidrohimicheskih i gidrobiologicheskih pokazatelej biocenoza aktivnogo ila v processe podkormki substratom, soderzhashchim biologicheski aktivnye komponenty* [Investigation of hydrochemical and hydrobiological indicators of the biocenosis of activated sludge in the process of fertilizing with a substrate containing biologically active components]. *Materialy studencheskoj nauchnoj konferencii za 2021 god* [Materials of the student scientific conference for 2021], 2021, pp. 283.

Сведения об авторах

✉*Дочкина Юлия Николаевна* – ведущий инженер лаборатории промышленной экологии и промышленной безопасности, старший преподаватель кафедры промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», пр. Революции, 19, г. Воронеж, Российская Федерация, 394036, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9113-1564, e-mail: dochkina.j.n@yandex.ru.

Плякина Алина Анатольевна – студентка кафедры промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», пр. Революции, 19, г. Воронеж, Российская Федерация, 394036, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7848-2685, e-mail: alina.plyakina7@gmail.com.

Корчагин Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», пр. Революции, 19, г. Воронеж, Российская Федерация, 394036, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7212-1627, e-mail: kvi-vgta@rambler.ru.

Information about the authors

✉ *Yulia N. Dochkina* – leading engineer of the laboratory of industrial ecology and industrial safety, senior lecturer of the department of industrial ecology, equipment of chemical and petrochemical industries, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, Russian Federation, 394036, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9113-1564, e-mail: dochkina.j.n@yandex.ru.

Alina A. Plyakina – student of the department of industrial ecology, equipment of chemical and petrochemical industries, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, Russian Federation, 394036, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7848-2685, e-mail: alina.plyakina7@gmail.com.

Vladimir I. Korchagin – Doctor of technical sciences, professor, head of the department of industrial ecology, equipment of chemical and petrochemical industries, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, Russian Federation, 394036, ORCID: http://orcid.org / 0000-0001-7212-1627, e-mail: kvi-vgta@rambler.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/5

УДК 631.445.4:504.53(470.324)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ХВОЕ ИНТРОДУЦЕНТОВ В ЗЕЛЕНОЙ ЗОНЕ Г. НУР-СУЛТАН

Светлана А. Кабанова[1], kabanova.05@mail.ru, 0000-0002-3117-7381
✉ **Матвей А. Данченко**[2], mtd2005@sibmail.com, 0000-0002-5974-9556
Сабина А. Скотт[3], sabina.a.scott@gmail.com, 0000-0002-2029-8938
Андрей Н. Кабанов[1], 7058613132@mail.ru, 0000-0002-5479-3689
Наталья В. Цветкова[2], tsvetkovanatasha@mail.ru 0000-0002-6492-2595
Виталий Ю. Кириллов [1], vitaliy.kirillov.82@mail.ru. 0000-0001-8056-4073

[1] *Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации, г. Щучинск, Республика Казахстан*
[2] *НИ Томский государственный университет, г. Томск, Российская Федерация*
[3] *Государственный колледж Коламбуса, г. Коламбус, США*

Сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в хвое интродуцентов в зеленой зоне г. Нур-Султана. Исследованы 10-летние лесные культуры, созданные из интродуцированных хвойных пород рода Ель (*Picea*), Пихта (*Abies*) и Лиственница (*Larix*) в зеленой зоне г. Нур-Султана. Наибольшей способностью к поглощению тяжелых металлов обладает ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), далее в порядке уменьшения: ель черная (*Picea mariana* Mill.), ель Энгельмана (*Picea engelmannii* Parry ex Engelm.), пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.), ель колючая (*Picea pungens* Engelm.). В хвое интродуцентов обнаружено превышение ПДК свинца (Pb), кобальта (Co) и марганца (Mn). У всех изученных хвойных пород высокая концентрация марганца привела к понижению концентрации активного железа (Fe), соотношение марганец-железо у деревьев рода Ель отмечено 1,6-2,9 : 1. Содержание данного элемента у лиственницы сибирской было наибольшим (34,9 мг/кг), но и железо присутствовало тоже в достаточно большом количестве (19,7 мг/кг), поэтому соотношение марганец-железо составило 1,8 : 1. Газоустойчивость и склонность к накоплению в хвое тяжелых металлов, декоративность и высокую сохранность показала ель сибирская, которую можно рекомендовать для посадки в зеленой зоне. Устойчивостью к неблагоприятным экологическим факторам и декоративностью обладают также ель черная и ель Энгельмана. Аккумуляционная способность и сохранность лиственницы сибирской, как и пихты сибирской очень низкая, поэтому эти породы не следует рекомендовать для выращивания в условиях зеленой зоны г. Нур-Султана.

Ключевые слова: тяжелые металлы, интродуценты, ель сибирская, ель черная, ассимиляционный аппарат

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кабанова, С. А. Сравнительный анализ накопления тяжелых металлов в хвое интродуцентов в зеленой зоне г. Нур-Султан / С. А. Кабанова, М. А. Данченко, С. А. Скотт, А. Н. Кабанов, Н. В. Цветкова, В. Ю. Кириллов // Лесотехнический журнал. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 57–67. – *Библиогр.: с. 63–66 (21 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/5.

Поступила: *10.06.2021* ***Принята к публикации:****10.12.2021* ***Опубликована онлайн:*** *30.12.2021*

COMPARATIVE ANALYSIS OF HEAVY METALS ACCUMULATION IN THE NEEDLE OF INTRODUCED SPECIES IN THE GREEN ZONE OF NUR-SULTAN

Svetlana A. Kabanova[1], kabanova.05@mail.ru, 0000-0002-3117-7381
Matvei A. Danchenko[2] ✉, mtd2005@sibmail.com, 0000-0002-5974-9556
Sabina A. Scott [3], sabina.a.scott@gmail.com, 0000-0002-2029-8938
Andrei N. Kabanov[1], 7058613132@mail.ru, 0000-0002-5479-3689
Natalya V. Tsvetkova[2], tsvetkovanatasha@mail.ru 0000-0002-6492-2595
Vitaliy Yu. Kirillov[1], vitaliy.kirillov.82@mail.ru. 0000-0001-8056-4073

[1] Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, Shchuchinsk, Republic of Kazakhstan
[2] SI Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation
[3] Columbus State College, Columbus, USA

Abstract

Comparative analysis of heavy metal accumulation in the needles of introduced species in the green zone of Nur-Sultan has been carried out. 10-year-old forest plantations created from introduced conifers of the genus Spruce (Picea), Fir (Abies) and Larch (Larix) have been investigated in the green zone of Nur-Sultan. Siberian spruce (Picea obovata Ledeb.) has the greatest ability to absorb heavy metals, then (in decreasing order): black spruce (Picea mariana Mill.), Engelmann spruce (Picea engelmannii Parry ex Engelm.), Siberian fir (Abies sibirica Ledeb.), Siberian larch (Larix sibirica Ledeb.), Colorado spruce (Picea pungens Engelm.). The needles of introduced species were found to exceed the MPCs for lead (Pb), cobalt (Co), and manganese (Mn). High concentration of manganese led to a decrease in the concentration of active iron (Fe), the manganese-iron ratio in trees of the Spruce genus was 1.6-2.9: 1 in all the studied conifers. The content of this element in Siberian larch was the highest (34.9 mg/kg) one, but iron was also present in a fairly large amount (19.7 mg/kg), so the manganese-iron ratio was 1.8:1. Gas resistance and a tendency to accumulate heavy metals in needles, decorativeness and high preservation have been shown by spruce Siberian, which can be recommended for planting in the green zone. Black spruce and Engelman spruce are also resistant to unfavorable environmental factors and decorative. The accumulation capacity and safety of Siberian larch, as well as Siberian fir, is very low, so these species should not be recommended for growing in the green zone of Nur-Sultan.

Keywords: heavy metals, introduced species, Siberian spruce, black spruce, assimilation apparatus

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

For citation: *Kabanova S.A., Danchenko M.A., Scott S.A., Kabanov A.N., Tsvetkova N.V., Kirillov V.Yu.* (2021) Comparative analysis of the accumulation of heavy metals in the needles of introduced species in the green zone of Nur-Sultan. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (4), pp. 57-67 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/5.

Received: 10.06.2021 ***Revised***: 22.10.2021 ***Accepted***: 10.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

Созданию пригородных лесов вокруг столицы Казахстана уделяется большое внимание. Первые посадки крупномерных саженцев в зеленой зоне г. Нур-Султан на площади 22 га были сделаны в 1997 году. С 1998 года практически ежегодно посадку искусственных насаждений начали проводить на площади 2,5 тыс. га. С 2006 года лесоразведение проводится с ежегодным объемом посадки 5,0 тыс. га. Лесные угодья в зеленой зоне составляют 45 %, из них покрытые лесом площади занимают 3,9 %. Большую часть площади лесных уго-

дий занимают несомкнувшиеся лесные культуры (86,6 %). Нелесные угодья состоят в основном из пахотных угодий и залежей, прочие земли занимают не более 15 %.

По мере ускорения урбанизации антропогенная деятельность вносит большие объемы загрязняющих веществ в пригородную зеленую зону, вызывая сильное загрязнение атмосферного воздуха и почв тяжелыми металлами [1,2]. В настоящее время тяжелые металлы (ТМ), т.е. химические элементы с атомной массой больше 50, рассматриваются с медицинской и природоохранной стороны, т.к. изучаются не только их химические свойства, но и степень влияния на здоровье человечества и окружающую среду. Наиболее вредными и опасными для человека с медицинской точки зрения являются ртуть (Hg), таллий (Tl), кадмий (Cd), свинец (Pb) и мышьяк (As) – превышение их допустимых норм способствует психофизиологическим нарушениям и даже летальному исходу. Но некоторые виды тяжелых металлов присутствуют в человеческом организме, участвуют в его жизнедеятельности и являются необходимыми микроэлементами (железо (Fe), цинк (Zn), медь (Cu) и др.).

Недавние успехи были достигнуты в понимании загрязнения почвы тяжелыми металлами, а также годовых колебаний как промышленных, так и городских почв [3, 4, 5, 6]. В связи с постоянным технологическим прогрессом в процессе индустриализации и урбанизации выброс токсичных загрязнителей, таких как тяжелые металлы, в природные ресурсы стал серьезной проблемой во всем мире. Древесные растения имеют более глубокие корни, большую биомассу и характеристики более длительного цикла роста, что, таким образом, может иметь более долгосрочное положительное влияние на восстановление после загрязнения тяжелыми металлами. Недавнее исследование показало, что реакция городских древесных растений на тяжелые металлы играет важную роль в развитии городского озеленения и восстановлении тяжелых металлов в городских почвах и зеленых насаждениях [7, 8]. Насаждения теряют устойчивость, деревья суховершинят и отмирают, изменяется окраска и густота ассимиляционного аппарата, рост древесных растений замедляется [9]. Многие авторы указывают на способность древесных растений аккумулировать ТМ в листьях, хвое и коре, в меньшей степени в почках, репродуктивных органах и древесине. [10, 11, 12, 13, 14,15]. На степень поглощения растениями ТМ влияет расстояния от источника загрязнения. При близком расположении зеленых насаждений к автостраде в листьях и хвое древесных растений наблюдается повышенное содержание ТМ, причем наиболее выраженной способностью к их поглощению характеризуются тополя [16, 17, 18]. Кроме того, высказано предположение об увеличении концентрации ТМ с возрастом дерева, в зависимости от видовой принадлежности и высоты местопроизрастания [19]. Самые высокие концентрации железа были для *Pinus nigra*, цинка в *Picea pungens*, свинца в *Pinus sylvestris* и для всех других тяжелых металлов в *Abies bornmülleriana* [20].

Экологическую составляющую зеленой зоны вокруг города в степи трудно переоценить. Но почвенно-климатические условия создают определенные трудности для сохранности зеленых насаждений. Большая пятнистость и засоление почв, резко-континентальный климат негативно влияют на рост древесных и кустарниковых растений. Поэтому был заложен опыт по введению в зеленую зону хвойных интродуцентов. Это оправданно, т.к. деревья рода Ель (*Picea*) имеют поверхностную корневую систему и на их росте сильно не отражается карбонатный слой в почве и засоление.

Целью исследований являлось проведение сравнительного анализа накопления тяжелых металлов в хвое интродуцентов в зеленой зоне г. Нур-Султана.

Методы

Объектами исследований являлись 10-летние лесные культуры, созданные из интродуцированных хвойных пород в зеленой зоне г. Нур-Султана. Ряд интродуцентов был высажен в межкулисное пространство между рядами взрослых лесных культур березы повислой. Пробная площадь располагалась на равноудаленном расстоянии от оживленной автомагистрали и городской черты и составляла около 5 км. Для сравнения динамики накопления химических элементов был заложен опыт на пробной площади, расположенной рядом с

автострадой только для ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.), т.к. аналогичных одновозрастных лесных культур других видов хвойных растений больше нет. Пробная площадь вдали от источника загрязнения считалась фоновым (Сфон), а пробная площадь рядом с автрострадой, – фактической (Сфакт).

Отбор растительного материала, его обработка и переработка выполнялась в соответствии существующими методиками [21].

Образцы отбирались на нижних ветках деревьев с указанием места отбора, расстояния от транспортных магистралей, вида, высоты растения, высоты взятия пробы. Отбиралась смешанная проба с деревьев одного вида. Отбор проводился в сухую погоду, как минимум после 3-х дней без осадков (для исключения занижения результатов за счет фиксируемого вымывания элементов). Для исследований брались пробы с тем условием, чтобы средняя проба составляла не менее 0,3 кг сырой массы. Хвоя собиралась со многих деревьев, в дальнейшем отбирался средний образец. Ассимиляционный аппарат помещался в холщовые мешочки, далее хвоя промывалась дистиллированной водой, подсушивалась и фиксировалась в сушильном шкафу при температуре 105^0С в течение 15 минут, с последующим досушиванием при температуре $+65^0$С в течение 2 часов. Затем пробы отправлялись для проведения анализов в специализированную лабораторию Казахстанско-японского инновационного центра.

Полученные результаты были обработаны методами статистического анализа. Коэффициент концентрации вычислялся как отношение фактического содержания определяемого вещества в хвое на пробе, расположенной ближе к автодороге, к его содержанию в аналогичной природной среде на фоновом участке [12]:

$$K_к = \frac{C_{факт}}{C_{фон}} \quad (1)$$

Где Сфакт - содержания определяемого вещества в точке опробования,

Сфон – содержание определяемого вещества на фоновом участке.

Результаты

Интродуцированные хвойные породы рода Ель (*Picea*) больше всего аккумулировали в хвое цинк и марганец, причем наиболее активно – ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.). Содержание в ассимиляционном аппарате ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) указанных тяжелых металлов было наименьшим. В целом, лучше всего очищает городской воздух от загрязнения ель сибирская, затем по значимости идет ель Энгельмана (*Picea engelmannii* Parry ex Engelm.), ель колючая и ель черная (*Picea mariana* Mill.) (рис. 1). Следует отметить, что имеются различия в скорости накопления тяжелых металлов. Так, ель сибирская слабее аккумулирует железо (9,45 мг/кг), тогда как на 1 кг сухого вещества хвоя ели черной содержит 14,95 мг/кг железа, а ель Энгельмана активнее аккумулирует кобальт и кадмий.

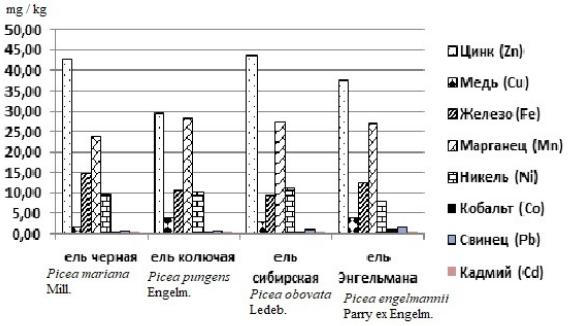


Рисунок 1. Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в хвое рода Ель (*Picea*)

Figure 1. The content of heavy metals (mg / kg) in the needles of the genus Spruce (Picea)

Другие хвойные породы рода Пихта (*Abies*) и Лиственница (*Larix*) рассмотрены нами отдельно. Наиболее активно они накапливают в ассимиляционном аппарате цинк, железо, марганец и кобальт. По сравнению с родом Ель (*Picea*) данные интродуценты аккумулируют кадмий в несколько большем количестве, причем у пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) и лиственницы сибирской содержание металла наблюдается в пределах нормы, но следует отметить, что у лиственницы (*Larix sibirica* Ledeb.) - в самом верхнем ее пределе (рис. 2).

Сравнение распределения тяжелых металлов в видах растений выявило наличие ряда закономерностей: наибольшей способностью к поглощению элементов, следовательно, к очищению атмосферы от тяжелых металлов обладает ель сибирская, далее в порядке уменьшения: ель черная, ель Энгельмана,

пихта сибирская, лиственница сибирская, наименьшей способностью обладает ель колючая (рис. 3).

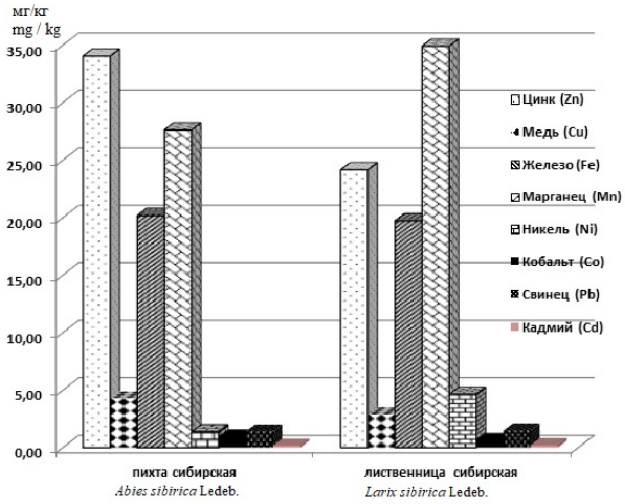


Рисунок 2. Содержание тяжелых металлов у интродуцентов родов Пихта (*Abies*) и Лиственница (*Larix*)

Figure 2. The content of heavy metals in introduced species of the genera Fir (Abies) and Larch (Larix)

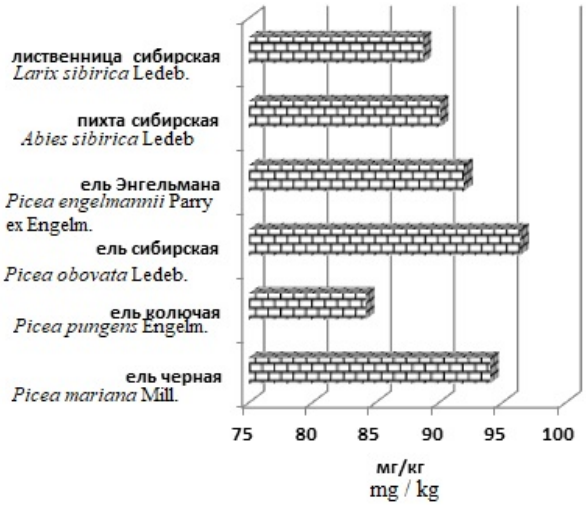


Рисунок 3. Суммарное содержание тяжелых металлов в хвое древесных растений

Figure 3. The total content of heavy metals in the needles of woody plants

По полученным данным можно сделать предварительные выводы о наиболее экологически оправданных древесных породах для очищения городского воздуха от примеси тяжелых металлов. Наиболее газоустойчивыми показали себя хвойные породы – ель сибирская и ель черная.

Внушает опасение значительное превышение ПДК в листьях растений опасного тяжелого металла кобальта и свинца. Но в то же время можно сказать, что из-за депонирования вредных веществ в ассимиляционном аппарате деревьев, содержания данных металлов в воздухе значительно снижается.

Для сравнения быстроты накапливания тяжелых металлов в местах возле автодороги и в более удаленном, были выбраны идентичные одновозрастные культуры ели сибирской (табл. 1).

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов у ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на двух фонах

Table 1

The content of heavy metals in Siberian spruce (Picea obovata Ledeb.) On two backgrounds

Элементный состав, мг/кг | Elemental composition, mg/kg	Содержание тяжелых металлов | Heavy metal composition		Превышение Сфак/Сфон, % | Increase Cfac/Cbg, %	Коэффициент концентрации | Concentration coefficient	ПДК (по Прохоровой)| MPC (Prokhorova)
	Сфак| Cfac	Сфон | Cbg			
Цинк (Zn)	1,41	43,69	28,86	1,41	150
Медь(Cu)	5,28	2,99	43,37	1,77	15
Железо (Fe)	13,99	9,46	32,38	1,48	20
Марганец (Mn)	35,31	27,39	22,43	1,29	25
Никель (Ni)	15,97	11,19	29,93	1,43	20
Кобальт (Co)	1,32	0,57	56,97	2,32	1
Свинец(Pb)	2,08	1,0	51,92	2,08	0,5
Кадмий (Cd)	0,22	0,12	47,26	10,90	0,5
	135,58	96,40			

Из таблицы видно, что в более удаленном от автомагистрали месте накопление тяжелых метал-

лов ниже на 22,4-56,9%, предельно-допустимую концентрацию тяжелых металлов в хвое растений превышали марганец и свинец на обеих пробных площадях. Содержание кобальта и свинца в хвое ели сибирской имело значительное различие между пробными площадями, коэффициент концентрации составил соответственно 2,32 и 2,08.

Отдельно рассмотрим отношение растений к железу и марганцу. Марганец принимает активное участие в обмене веществ растений, улучшает их естественные физиологические процессы и необходим для жизнедеятельности деревьев. Марганец накапливается в листьях в течение всего вегетационного периода и участвует в выделении кислорода. Среднее его содержание в листьях составляет 1 мг/кг сухой массы. В ходе проведения исследований выявлено, что в ассимиляционном аппарате всех без исключения растений наблюдается значительное превышение данного элемента. Избыток марганца неблагоприятно сказывается на росте и состоянии растений. Из литературных данных [6] известно, что некоторые древесные породы являются манганофиллами, т.к. «любителями» марганца - это березы и сосна. У изученных хвойных пород магний аккумулировался в пределах нормы или превышал его, но не в критических размерах. Высокая концентрация марганца приводит к понижению концентрации активного железа, что мы и видим на нашем примере. Оптимальное соотношение железа и марганца должно находиться в соотношении 2:1, но нами отмечено значительное превышение содержания марганца – у деревьев рода Ель (*Picea*) – 1,6-2,9 раз. Содержание данного элемента у лиственницы сибирской было наибольшим (34,9 мг/кг), но и железо присутствовало тоже в достаточно большом количестве (19,7 мг/кг), поэтому соотношение марганец-железо составило 1,8 раз. Следовательно, при таком соотношении указанных элементов растения могут быть ослаблены и у них может наступить хлороз.

Следует учесть, что не только газоустойчивость и способность аккумулировать тяжелые металлы должна присутствовать у древесных пород, рекомендуемых к посадке в зеленой зоне. Немаловажный фактор для озеленения - декоративность деревьев, а особенно важным моментом является приживаемость и сохранность культур в зеленой зоне, состояние и рост деревьев. Поэтому рассмотрим все указанные признаки в совокупности (табл. 2).

Таблица 2

Основные биометрические показатели хвойных интродуцентов и сумма накопленных тяжелых металлов

Table 2

Main biometric indicators of coniferous introduced species and the amount of accumulated heavy metals

Порода| Species	Сохранность, %| Preservation, %	Высота, см| Height, cm	Диаметр, см| Diameter, cm	Сумма аккумул. ТМ, мг/кг| Accumulation sum of HM, mg/kg
Ель Энгельмана| *Picea engelmannii* Parry ex Engelm.	47,9±0,4	143,4±0,1	2,1±0,2	90,1
Ель колючая| *Picea pungens* Engelm.	57,5±0,2	155,8±0,2	3,2±0,3	84,2
Ель черная| *Picea mariana* Mill.	29,0±0,1	184,1±0,2	2,3±0,1	94,0
Ель сибирская| *Picea obovata* Ledeb.	76,8±0,5	211,6±0,1	3,3±0,1	96,4
Пихта сибирская | *Abies sibirica* Ledeb.	16,4±0,1	95,9±0,2	1,9±0,1	90,1
Лиственница сибирская| *Larix sibirica* Ledeb.	29,7±0,2	317,1±0,4	4,5±0,2	88,7

Из табл. 2 видно, что наибольшей аккумулятивной способностью деревьев рода Ель (*Picea*)

отличается ель сибирская, причем основные таксационные показатели и сохранность также превышают количественные признаки других видов ели. При низкой сохранности (29,0 %) ель черная имеет значительную накопительную способность тяжелых металлов, а сохранившиеся деревья декоративны и в возрасте 8 лет данный вид ели начал плодоносить, причем шишки у нее очень красивые, красно-кирпичного или лилового цвета. Также следует отметить ель Энгельмана, хотя таксационные показатели значительно отстают от других видов ели, данный вид имеет наиболее декоративный вид.

Лиственница сибирская имеет наибольшие показатели по всем наблюдаемым признакам, а следовательно, и фитомассу, что соответствует ее биологическим особенностям, но по количеству аккумулированного количества тяжелых металлов находится на 5 месте.

Заключение

Проведенные опыты еще раз доказывают вредное влияние урбанизации и индустриализации на экологию городов, в результате чего большое количество тяжелых металлов содержится в воздухе населенных пунктов. Часть поллютантов оседает в почве, древесине, коре и ассимиляционном аппарате древесных растений. В зеленой зоне г. Нур-Султана были созданы лесные культуры из хвойных интродуцентов, на примере которых было изучено содержание тяжелых металлов в хвое.

Наибольшей способностью к поглощению элементов, следовательно, к очищению атмосферы от тяжелых металлов, обладает ель сибирская (суммарно накопленные тяжелые металлы составили 96,4 мг/кг), далее в порядке уменьшения: ель черная (94,0 мг/кг), ель Энгельмана (90,1 мг/кг), пихта сибирская (90,1 мг/кг), лиственница сибирская (88,7 мг/кг), ель колючая (84,2 мг/кг). В хвое интродуцентов наблюдалось превышение ПДК свинца, кобальта и марганца, остальные химические элементы присутствовали в хвое в допустимых пределах.

Вызывает тревогу содержание марганца и железа в хвое интродуцентов, т.к. у всех изученных пород высокая концентрация марганца привела к понижению концентрации активного железа, соотношение марганец-железо у деревьев рода Ель отмечено 1,6-2,9 : 1. Содержание данного элемента у лиственницы сибирской было наибольшим (34,9 мг/кг), но и железо присутствовало тоже в достаточно большом количестве (19,7 мг/кг), поэтому соотношение марганец-железо составило 1,8 : 1. При таком соотношении указанных элементов растения ослаблены и у них может наступить хлороз.

Поскольку для получения устойчивых и красивых насаждений зеленой зоны столицы Казахстана необходимы древесные растения не только газоустойчивые, но и декоративные, можно рекомендовать для посадки в культуры ель сибирскую, ель черную и ель Энгельмана. Данные хвойные породы в значительной мере аккумулируют тяжелые металлы в ассимиляционном аппарате и являются наиболее декоративными. Аккумуляционная способность и сохранность лиственницы сибирской, как и пихты сибирской очень низкая, поэтому для условий зеленой зоны г. Нур-Султана эти породы рекомендовать не представляется возможным.

This research is funded by the Ministry of Ecology, Geology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan (No. BR10263776)

Данное исследование финансируется Министерством экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан (No. BR10263776)

Список литературы

1. Бин Х.Э., Юнь З.Дж., Ши Дж.Б., Цзян Г.Б. Прогресс исследований загрязнения тяжелыми металлами в Китае: источники, аналитические методы, статус и токсичность. Китайский научный бюллетень. 2013. Вып. 58. С. 134–140. DOI: 10.1007/s11434-012-5541-0.

2. Коротченко И.С., Мучкина Е.Я. Сравнительная оценка накопления тяжелых металлов лиственными и хвойными породами в условиях техногенного загрязнения. Материалы конференции: «Механизмы

устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды. Иркутск. 2018. С. 1067-1069. http://www.sifibr.irk.ru/images/publications/mrpmue2018/251.pdf.

3. Пенья-Фернандес А., Лобо-Бедмар М.С., Гонсалес-Муньос М.Дж. Годовая и сезонная изменчивость металлов и металлоидов в городских и промышленных почвах в Алькала-де-Энарес (Испания). 2015. Environ Res. Вып. 136. С. 40–46. DOI:10.1016/j.envres.2014.09.037.

4. Ло Х. С., Шен Ю., Чжу Ю.Г., Ли Х. Д. Загрязнение следами металлов в городских почвах Китая. 2012. Наука об окружающей среде в целом. Выпуск 421. С. 17–30. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.020.

5. Домбровски П., Понецка Б., Бачевска А.Х., Гворек Б. Влияние дорожного движения на загрязнение почвы и растений свинцом и хромом. 2016. Przemysl Chemiczny. Вып. 95. С. 384–388. DOI:10.15199/62.2016.3.10.

6. Чжао З., Хазелтон П. Оценка накопления и концентрации тяжелых металлов в различных типах городских придорожных почв в парке Миранда, Сидней. 2016. Журнал почв и отложений. Вып. 16. С. 2548–2556. DOI:10.1007/s11368-016-1460-z.

7. Гори З. Фитоэкстракция: Использование растений для удаления тяжелых металлов из почвы. 2016. Elsevier Inc. С. 385–409. DOI:10.1016/B978-0-12-803158-2.00015-1.

8. Ayan S., Sarsekova D., Kenesaryuly G., Yilmaz E., Gülseven O., Şahin İ. (2021): Accumulation of heavy metal pollution caused by traffic in forest trees in the park of Kerey and Janibek Khans of the city of Nur-Sultan, Kazakhstan. Journal of Forest Science, 67: 357–366. https://DOI.org/10.17221/37/2021-JFS.

9. Узаков З.З. Тяжелые металлы и их влияние на растения // Символ науки. 2018. № 1-2. С. 52-53. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tyazhelye-metally-i-ih-vliyanie-na-rasteniya.

10. Кузнецова Т.Ю., Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Аккумуляция тяжелых металлов в различных органах и тканях березы в зависимости от условий произрастания. Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 1. С. 86–94. DOI: 10,17076/eco27.

11. Копылова Л.В. Экологическая роль Ulmus pumila L. В ограничении поступления тяжелых металлов в окружающую среду некоторых техногенных территорий Забайкальского края. Самарский научный вестник. 2018. № 4. С. 57-63. DOI: 10.2441/2309-4370-2018-14110.

12. Ташенова А.Ж., Торопов А.С. Использование листьев как биогеохимических индикаторов состояния городской среды. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. № 5. С. 114-124. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-listiev-rasteniy-kak-biogeohimicheskih-indikatorov-sostoyaniya-gorodskoy-sredy.

13. Уфимцева М.Д. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биохимических провинциях. Геохимия. 2015. № 5. С. 450-465. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23299407.

14. Cetin M., Sevik H., Cobanoglu O. (2020). Ca, Cu, and Li in washed and unwashed specimens of needles, bark, and branches of the blue spruce (*Picea pungens*) in the city of Ankara. Environmental Science and Pollution Research. DOI:10.1007/s11356-020-08687-3.

15. Kang H.H., Liu X.H., Guo J.M., Wang B., Xu G.B., Wu G.J., Kang S.C., Huang J. (2019). Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China. Ecological Indicators, 104(0), 24-31. doi:10.1016/j.ecolind.2019.04.066

16. Сидоркина З.И., Макаревич Р.А. Оценка состояния возможностей восстановления аборигенных видов хвойных пород в городском ландшафте Владивостока. Псковский областной журнал. 2015. Т. 23. С. 51-58. URL: https://e.lanbook.com/journal/issue/296595.

17. Колмогорова Е.Ю. Содержание металлов в листьях древесных растений, произрастающих в условиях породного отвала «Кедровского» угольного разреза. Бюллетень науки и практики. 2018. № 9. С. 32-35. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-tyazhelyh-metallov-v-listyah-drevesnyh-rasteniy-proizrastayuschih-v-usloviyah-porodnogo-otvala-kedrovskogo-ugolnogo.

18. Подлужная А.С., Бадмаева С.Е. Накопление тяжелых металлов в древесных растениях скверов и парков правобережья Красноярска. Вестник КрасГАУ. 2016. № 5. С. 91-95. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/nakoplenie-tyazhelyh-metallov-v-drevesnyh-rasteniyah-skverov-i-parkov-pravoberezhya-krasnoyarska.

19. Korzeniowska J., Kraz P., Dorocki S. Heavy Metal Content in the Plants (Pleurozium schreberi and Picea abies) of Environmentally Important Protected Areas of the Tatra National Park (the Central Western Carpathians, Poland). Minerals 2021, 11, 1231. https://DOI.org/10.3390/min11111231.

20. Turkyilmaz A., Sevik H., Cetin M. (2018). The use of perennial needles as biomonitors for recently accumulated heavy metals. Landscape and Ecological Engineering, 14(1), 115–120. DOI:10.1007/s11355-017-0335-9.

21. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. Н. Г. Зырина, С. Г. Малахова. Москва : Гидрометеоиздат, 1981. 108 с.

References

1. Bin H.E., Yun Z.J., Shi J.B., Jiang G.B. Research progress of heavy metal pollution in China: Sources, analytical methods, status, and toxicity. Chinese Science Bulletin. 2013. Vol. 58. p. 134–140. DOI: 10.1007/s11434-012-5541-0

2. Korotchenko I. S., Muchkina E. Ya. Comparative assessment of the accumulation of heavy metals in deciduous and coniferous species in conditions of technogenic pollution. Conference materials: "Mechanisms of resistance of plants and microorganisms to unfavorable environmental conditions. Irkutsk. 2018. p. 1067-1069. (In Russ.). http://www.sifibr.irk.ru/images/publications/mrpmue2018/251.pdf

3. Peña-Fernández A., Lobo-Bedmar M.C., González-Muñoz M.J. Annual and seasonal variability of metals and metalloids in urban and industrial soils in Alcala de Henares (Spain). 2015. Environ Res. Vol. 136. p. 40–46. DOI:10.1016/j.envres.2014.09.037

4. Luo X.S., Shen Y., Zhu Y.G., Li X.D. Trace metal contamination in urban soils of China. 2012. Science of The Total Environment. Vol. 421. p. 17–30. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.020

5. Dabrowski P., Poniecka B., Baczewska A.H., Gworek B. The effect of road traffic on soil and plant contamination with lead and chromium. 2016. Przemysl Chemiczny. Vol. 95. p. 384–388. DOI:10.15199/62.2016.3.10

6. Zhao Z., Hazelton P. Evaluation of accumulation and concentration of heavy metals in different urban roadside soil types in Miranda Park, Sydney. 2016. Journal of Soils and Sediments. Vol. 16. p. 2548–2556. DOI:10.1007/s11368-016-1460-z

7. Ghori Z. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soil. 2016. Elsevier Inc. p. 385–409. DOI:10.1016/B978-0-12-803158-2.00015-1

8. Ayan S., Sarsekova D., Kenesaryuly G., Yilmaz E., Gülseven O., Şahin İ. (2021): Accumulation of heavy metal pollution caused by traffic in forest trees in the park of Kerey and Janibek Khans of the city of Nur-Sultan, Kazakhstan. Journal of Forest Science, 67: 357–366. https://DOI.org/10.17221/37/2021-JFS

9. Uzakov Z.Z. Heavy metals and their effect on plants. Symbol of science. 2018. Vol. 1-2. p. 52-53. (In Russ.). https://cyberleninka.ru/article/n/tyazhelye-metally-i-ih-vliyanie-na-rasteniya

10. Kuznetsova T.Yu., Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Accumulation of heavy metals in various organs and tissues of birch, depending on the growing conditions. Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. Vol. 1. p. 86–94. DOI: 10,17076/eco27 (In Russ.).

11. Kopylova L.V. Ecological role of Ulmus pumila L. In limition the supply of heavy metals to the environment of some technogenic territories of the Trans-Baikal Territory. Samara Scientific Bulletin. 2018. Vol. 4. – p. 57-63. DOI: 10.2441/2309-4370-2018-14110. (In Russ.).

12. Tashenova A.Zh., Toropov A.S. Application of leaves as biogeochemical of urban environment state. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2017. Vol. 5. – p. 114-124. (In Russ.).

https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-listiev-rasteniy-kak-biogeohimicheskih-indikatorov-sostoyaniya-gorodskoy-sredy

13. Ufimtseva M.D. Regularities of the accumulation of chemical elements by higher plants and their reactions in anomalous biochemical provinces. Geochemistry. 2015. Vol. 5. – p. 450-465. (In Russ.). https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23299407

14. Cetin M., Sevik H., Cobanoglu O. (2020). Ca, Cu, and Li in washed and unwashed specimens of needles, bark, and branches of the blue spruce (Picea pungens) in the city of Ankara. Environmental Science and Pollution Research. DOI:10.1007/s11356-020-08687-3

15. Kang H.H., Liu X.H., Guo J.M., Wang B., Xu G.B., Wu G.J., Kang S.C., Huang J. (2019).Characterization of mercury concentration from soils to needle and tree rings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) of the middle Tianshan Mountains, northwestern China. Ecological Indicators, 104(0), 24-31. DOI:10.1016/j.ecolind.2019.04.066

16. Sidorkina Z.I., Makarevich R.A. Assessment of the state of possibilities for the restoration of native species of conifers in the urban landscape of Vladivostok. Pskov Regional Journal. 2015. Vol. 23. p. 51-58. (In Russ.).

17. Kolmogorova E.Yu. The content of metals in the leaves of woody plants growing in the conditions of the rock dump of the "Kedrovsky" coal mine. Science and Practice Bulletin. 2018. Vol. 9. p. 32-35. (In Russ.). https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-tyazhelyh-metallov-v-listyah-drevesnyh-rasteniy-proizrastayuschih-v-usloviyah-porodnogo-otvala-kedrovskogo-ugolnogo

18. Podluzhnaya A.S., Badmaeva S.E. Accumulation of heavy metals in woody plants of squares and parks on the right bank of Krasnoyarsk. KrasSAU Bulletin. 2016. Vol. 5. – p. 91-95. (In Russ.). https://cyberleninka.ru/article/n/nakoplenie-tyazhelyh-metallov-v-drevesnyh-rasteniyah-skverov-i-parkov-pravoberezhya-krasnoyarska

19. Korzeniowska, J.; Kraz, P.; Dorocki, S. Heavy Metal Content in the Plants (Pleurozium schreberi and Picea abies) of Environmentally Important Protected Areas of the Tatra National Park (the Central Western Carpathians, Poland). Minerals 2021, 11, 1231. https://DOI.org/10.3390/min11111231

20. Turkyilmaz A., Sevik H., Cetin M. (2018). The use of perennial needles as biomonitors for recently accumulated heavy metals. Landscape and Ecological Engineering, 14(1), 115–120. DOI:10.1007/s11355-017-0335-9.

21. Zyrina N.G., Malakhova S.G. Guidelines for conducting field and laboratory studies of soils and plants in the control of environmental pollution with metals. M.: Gidrometeoizdat. 1981. p. 108. (In Russ.).

Сведения об авторах

Кабанова Светлана Анатольевна – кандидат биологических наук, ассоц. профессор, Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесомелиорации, г. Щучинск, Республика Казахстан, e-mail: kabanova.05@mail.ru.

✉ *Данченко Матвей Анатольевич* – кандидат географических наук, доцент, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация, e-mail: mtd2005@sibmail.com.

Скотт Сабина Артуровна – Columbus State College, Коламбус, США, sabina.a.scott@gmail.com.

Кабанов Андрей Николаевич – Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесоводства, г. Щучинск, Республика Казахстан, e-mail: kabanova.05@mail.ru.

Цветкова Наталья Владимировна – Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация, e-mail: tsvetkovanatasha@mail.ru.

Кириллов Виталий Юрьевич – Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и агролесоводства, г. Щучинск, Республика Казахстан, e-mail: vitaliy.kirillov.82@mail.ru.

Infromation about the authors

Kabanova Svetlana Anatolevna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, Shchuchinsk, Republic of Kazakhstan, e-mail: kabanova.05@mail.ru.

✉ *Danchenko Matvei Anatol'evich* – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: mtd2005@sibmail.com.

Scott Sabina Arturovna – Columbus State College, Columbus, USA, e-mail: sabina.a.scott@gmail.com.

Kabanov Andrej Nikolaevich – Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, Shchuchinsk, Republic of Kazakhstan, e-mail: kabanova.05@mail.ru.

Tsvetkova Natalia Vladimirovna – National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, e-mail: tsvetkovanatasha@mail.ru.

Kirillov Vitaliy Yur'evich – Candidate of chemical Sciences, Associate Professor, Kazakh Research Institute of Forestry and Agroforestry, Shchuchinsk, Republic of Kazakhstan, e-mail: vitaliy.kirillov.82@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6

УДК 631.445.4:504.53(470.324)

МИГРАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЛЕСНЫХ ЛАНДШАФТАХ

Татьяна Н. Крамарева[1] ✉, e-mail: kramarewa@mail.ru, 0000-0001-7363-1215
Надежда С. Горбунова[2], e-mail: vilian@list.ru, 0000-0002-7986-8106
Елена В. Куликова[3], e-mail: melior-agronomy@inbox.ru, 0000-0002-3106-7422

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

[2]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394018, Россия*

[3]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия*

Применение полезащитных лесных насаждений в лесостепной и степной зонах Центрально-Черноземного региона является эффективным мелиоративным приемом. Лесные полосы снижают скорость ветра, уменьшают вредное воздействие суховеев. Важной особенностью лесополос является накопление и равномерное распределение снега на полях. Это приводит к улучшению водного баланса, а вместе с тем и к трансформации почв. Согласно полученным данным, выявлено существенное достоверное изменение черноземов под влиянием лесных полос в условиях Каменной степи. В черноземах под лесной растительность произошло изменение морфологических признаков, содержания гумуса, pH почвенного раствора. Такая трансформация повлекла за собой изменение и в валовом содержании ТМ и их обменных соединениях. Под древесными культурами происходят изменения в профильном перераспределении исследуемых ТМ. Корреляционный анализ выявил тесную связь в распределении pH, гумуса, валовом содержании и обменных соединениях ТМ. Вариационный анализ пространственной неоднородности полученных данных показал существенные различия исследуемых показателей между пашней и лесополосой. Происходит закономерное уменьшение коэффициента вариации от лесополосы к пашне. Данное явление происходит благодаря тому, что в процессе распашки перемешивание почвенной массы и выравнивание пространственных различий в содержании гумуса, pH, а также валовом содержании и обменных соединений ТМ. В лесополосе почвенные условия определяются характером растительности, которая вносит различия.

Ключевые слова: тяжелые металлы, никель, свинец, кадмий, валовое содержание, обменные соединения, лесополоса, черноземы обыкновенные

Благодарности: Авторы выражают благодарности рецензентам за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Крамарева Т. Н. Миграционные особенности тяжелых металлов в лесных ландшафтах // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 68–78. – *Библиогр.: с. 76–78 (14 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6.

Поступила: 10.11.2021 ***Принята к публикации***: 22.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

MIGRATION FEATURES OF HEAVY METALS IN FOREST LANDSCAPES

Tatyana N. Kramareva[1] ✉, e-mail: kramarewa@mail.ru, 0000-0001-7363-1215
Nadezhda S. Gorbunova[2], e-mail: vilian@list.ru, 0000-0002-7986-8106
Elena V. Kulikova[3], e-mail: melior-agronomy@inbox.ru, 0000-0002-3106-7422

[1] *FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, 8 Timiryazeva street, Voronezh, Russian Federation*

[2] *FSBEI HE Voronezh State University, 394036, 1 Universitetskaya square, 1, Voronezh, Russia*

[3] *FSBEI HE Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I, 394087, 1Michurina street, Voronezh, Russia*

Abstract

The use of field-protective forest plantations in the forest-steppe and steppe zones of the Central Black Earth region is an effective reclamation technique. Forest belts reduce wind speed, reduce the harmful effects of dry winds. An important feature of forest belts is the accumulation and uniform distribution of snow in the fields. This leads to an improvement in the water balance, and at the same time to the transformation of soils. According to the data obtained, a significant reliable change in chernozems under the influence of forest belts in the conditions of the Kamennaya Steppe was revealed. There was a change in morphological characteristics, humus content, pH of the soil solution in chernozems under forest vegetation. This transformation entailed a change in the total content of HMs and their exchange compounds. There are changes in the profile redistribution of the studied HMs under tree crops. Correlation analysis revealed a close relationship in the distribution of pH, humus, total content, and exchangeable HM compounds. Variational analysis of the spatial heterogeneity of the data obtained showed significant differences in the studied indicators between arable land and forest belt. There is a natural decrease in the coefficient of variation from the forest belt to arable land. This phenomenon occurs due to the fact that (in the process of plowing) mixing of the soil mass and leveling of spatial differences in the content of humus, pH, as well as the gross content and exchange compounds of HMs takes place. In the forest belt, soil conditions are determined by the vegetation, which makes the difference.

Keywords: heavy metals, nickel, lead, cadmium, gross content, exchangeable compounds, forest belt, ordinary chernozems

Acknowledgments: The authors are grateful to the reviewers for their contributions to the peer review of the article.

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

***For citation*:** Kramareva T.N. Migration features of heavy metals in forest landscapes. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 68-78 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6.

Received: 10.11.2021 ***Revised:*** 01.12.2021 ***Accepted***: 22.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

Лесные экосистемы играют важную роль в биогеохимической циркуляции многих элементов, в том числе и тяжелых металлов (ТМ) [5, 6]. Растения лесополос эффективно перехватывают аэрозоли и оседающие взвеси твердых веществ из дождя, снега, града, пыли. Данное положение подтвердилось экспериментально [9, 10, 13]. Выпадение некоторых элементов в лесу может в 5-6 раз превышать соответствующий показатель для открытых пространств [12]. Положительная мелиоративная роль лесных полос была научно обоснована еще

В.В. Докучаевым. Им же были спроектированы и реализованы первые агролесомелиоративные мероприятия, в том числе и на территории Каменной степи, где проводились наши исследования. В дальнейшем много научных публикаций было посвящено исследованию трансформации почвенного покрова под воздействием лесополос. Отмечается усиление биологического круговорота под действием лесной растительности [2, 7]. Полезащитные лесонасаждения увеличивают урожайность сельскохозяйственных культур, за счет улучшения водного баланса. Неоспоримо положительное влияние лесополос на процессы эрозии [10, 14]. Необходимо отметить роль древесных насаждений в связывании углерода углекислого газа, что приводит к уменьшению парникового эффекта [1]. Лесные полосы стали неотъемлемой частью ландшафта, выполняя его экологические функции [3, 4]. Известно, что в почвах под лесополосами создаются благоприятные условия для гумусонакопления благодаря постоянному поступлению в почву органического вещества в виде обилия отмерших корней, опада веток и листьев. Такие кардинальные изменения в почвенных процессах обязательно будут сопровождаться трансформацией морфологических, физических, физико-химических, химических, а также биологических свойств почв. Отмечается достоверное отличие почв лесополосы от пашни по таким физическим параметрам как плотность сложения, запасы ила и физической глины. В публикациях описывается трансформация гумуса [11], изменение микробной биомассы, дыхательной активности, азотфиксации [1].

Почвы, формирующиеся в однотипных условиях могут достоверно трансформироваться под влиянием лесополос [11]. В литературе, в том числе и зарубежной, очень мало информации о том, как происходит циркуляция тяжелых металлов между растениями и почвой и каков их баланс в лесных экосистемах [12]. Поэтому целью настоящей работы явилось изучение особенностей накопления и внутрипрофильного распределения ТМ (Ni, Pb, Cd) под одновозрастными лесными насаждениями Каменной степи, состоящими из различных древесных пород. Особенностью объекта исследования является то, что Каменная степь расположена вдали от всех антропогенных источников загрязнения.

Материалы и методы

Исследования проводились на территории землепользования ФГБНУ «Каменно-Степное опытное лесничество» (Таловский район Воронежской области). Объектами исследований послужили черноземы обыкновенные среднегумусные среднемощные тяжелосуглинистые, залегающие под разными секциями древесных пород лесной полосы № 211 и на примыкающей к ней пашне. Лесная полоса № 211 была заложена в 1959 году, ее длина составляет 850 м, а ширина 22 м. Лесная полоса представлена секциями с различными древесными породами: лиственница сибирская (*Larix siberica Ldb.*), географические координаты (**N,** ^{0}51,050917; **E,** ^{0}40,746058) клен остролистный (*Acer platanoides L.*) – (**N,** ^{0} 51,050580; **E,** ^{0} 40,748916), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris L.*) – (**N,** ^{0} 51,051847; **E,** ^{0} 40,739985) и береза бородавчатая (*Betula verrucosa Ehrh*) – (**N,** ^{0} 51,051302; **E,** ^{0} 40,743098). В каждой секции лесной полосы и на примыкающей к ней пашни (**N,** ^{0} 51,052328; **E,** ^{0} 40,747665) были заложены почвенные разрезы до глубины вскрытия почвообразующих пород, в качестве которых выступают покровные карбонатные тяжелые суглинки и глины.

Образцы почв из разрезов отбирались послойно каждые 10 см, в них определялись pH водной суспензии потенциометрическим методом на микропроцессорном иономере марки И-160МИ (Aquilon, Moscow, Russia), содержание гумуса по общепринятым методикам [8] с применением электронных аналитических весов HR-100ARG, лабораторной посуды и реактивов фирмы (Vekton, St. Petersburg, Russia). Среди ТМ исследовались Ni, Pb, Cd. Валовое содержание ТМ определяли спеканием почвы с карбонатом натрия в в муфельной печи SNOL (Umega, Lithuania), дальнейшей обработкой HNO_3 (1:1) и H_2O_2 (конц.), реактивы фирмы (Vekton, St. Petersburg, Russia). По мнению И.О. Плехановой, О.А. Золотаревой, И.Д. Тарасенко, А.С. Яковлева валовое содержание ТМ не дает исчерпывающие знания об экологической ситуации, а также о влиянии их на растения [5]. Для этого необходимо иметь информацию о подвижных соеди-

нениях, доступных для растений. Поэтому извлечение обменных соединений элементов из почвы, проводилось ацетатно-аммонийным буферным раствором (ААБ) с pH=4,8 в соотношении 1: 10 [9]. Конечное определение ТМ проводилось на спектрометре КВАНТ–Z.ЭТА ЭТА (Kortek, Moscow, Russia) атомно-абсорбционным методом. Вариационно-статистическая обработка полученных аналитических данных проводилась с использованием программ STATISTICA 10 и Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты по содержанию гумуса в черноземах обыкновенных пашни свидетельствуют, что интенсивное сельскохозяйственное использование почв приводит к усилению процессов минерализации. Происходит интенсивный вынос питательных элементов с урожаем сельскохозяйственных культур. Описанные явления приводят к потере органического вещества. Количество гумуса в гумусовом горизонте черноземов обыкновенных пашни не превышает 5,6 %, что относит почвы к малогумусным. Для черноземов расположенных под лесополосой, характерно увеличение содержание гумуса до 6,7±0,55 %, черноземы диагностируются как среднегумусные.

Содержание гумуса и его формы всегда являются не только отражением жизни почвенных организмов, но и определяется динамическим характером гумусообразования. Данный процесс определяется интенсивностью биологического круговорота, на который влияет развитие растительности [7]. Данное положение подтверждается нашими исследованиями. Так максимальное содержание гумуса в черноземах Каменной степи отмечается в 0-10 см слое под кленом (7,01±0,37%), минимальное под пашней (5,28±0,42%). Потеря органического вещества из пахотных почв связанна с процессами его усиленной минерализации в результате распашки. Кроме того, ежегодный вынос элементов питания с урожаем не в полной мере восполняется внесением органических удобрений. Что в последствие приводит к значительным потерям гумуса. Отмечается достоверная потеря гумуса из верхнего слоя пашни по сравнению с лесополосой. Вниз по профилю всех исследуемых участков происходит плавное снижение содержания органического вещества. В почвообразующей породе оно не превышает 0,11±0,05%. Как подчеркивают О.Г. Чертов и М.А. Надпорожская в своей работе [7] различный древостой влияет на формы гумуса. Наши исследования подтвердили достоверное влияние различных видов древесной растительности влияют на гумусное состояние черноземов. Содержание гумуса в черноземах обыкновенных под древесной растительностью в условиях Каменной степи, убывает в следующем ряду: почвы под кленом (7,01±0,37%) > березой (6,75±0,11%) > лиственницей (6,46±0,12%) > сосной (6,13±0,23%). В результате воздействия водных растворов лесного опада и хвойных подстилок происходит десорбция органических веществ из твердой фазы. В более подвижном состоянии они способны мигрировать в нижние горизонты почвенного профиля. Данным положением объясняется более мощный гумусовый горизонт в черноземах обыкновенных под древесными породами лесополосы. Под лиственницей и кленом мощность достигает 70 см, под березой 61 см, сосной 55 см, а в почвах под пашней сокращается до 50 см.

Для черноземов под пашней и лесополосой характерны различия в режимах миграции карбонатных соединений. В лесополосе формируются сравнительно прохладные микроклиматические условия, благодаря задержанию влаги. Задержанная влага способна мигрировать по почвенному профилю, что приводит к перемещению карбонатного горизонта в более глубокие слои. Так, в черноземах под пашней граница карбонатных новообразований диагностируется на глубине 43 см. Под древесными породами лесополосы линия вскипания опускается до глубины 62 см. Максимальная глубина, до которой опустились карбонаты, составляет 71 см. Она была зафиксирована под культурой сосны. Такое явление, возможно, связано, со спецификой корневых выделений сосны. Корневые выделения древесных пород имеют слабокислых характер, что сказалось на pH почвенного раствора. И если в пахотных почвах реакция среды нейтральная (pH=7,01±0,57), то в черноземах под лесополосой, она становиться слабокислой и уменьшается в следующей последовательности: (pH=6,81±0,83) лиственница > (pH=6,72±0,21) клена > (pH=6,62±0,56)

береза > (pH=6,41±0,41) сосна. Помимо процессов выщелачивания, в условиях лесполосы отмечается влияние биологического фактора. Кислые выделения корневых систем древесных растений вносят дополнительную нагрузку в выщелачивание карбонатов.

Статистический анализ полученных данных содержания гумуса и pH среды по определению пространственных различий между пашней и лесополосой в Каменной степи показал закономерное уменьшение коэффициента вариации V от 20±5,3% (лесополоса) до 9±1,7% (пашня). Такое явление объясняется тем, что распашка приводит к выравниванию пространственных различий исследуемых почвенных свойств. В лесополосе на почвенные условия оказывает влияние растительность, которая вносит различия. Идентичная закономерность отмечается и в работе [11].

Полученные данные по валовому содержанию Ni в исследуемых черноземах обыкновенных близко к кларкам почв и литосферы, которые составляют 40 и 58 мг/кг соответственно [5]. Согласно полученным данным отмечается закономерное увеличение валового содержания металла вниз к почвообразующей породе (рис. 1). Коллоиды и илистые частицы обладают большой сорбционной способностью к тяжелым металлам, в том числе и к Ni. Особенностью исследуемых карбонатных покровных глин является высокое содержание в них илистой и коллоидной фракций. Растительный покров также оказывает влияние на накопление и распределение металла. В верхнем 0-10 см слое валовое содержание Ni уменьшается в ряду (рис.1): клен (47,9±1,23 мг/кг) > береза (45,4±1,47 мг/кг) > пашня (43,2±1,78 мг/кг) > лиственница (33,0±1,11 мг/кг) > сосна (32,5±1,07 мг/кг).

Металл способен образовывать органоминеральные комплексные соединения. Поэтому вслед за уменьшением гумусом по профилю происходит и снижение количества Ni. Тесная взаимосвязь в профильном распределении Ni и гумусом подтверждается результатом корреляционного анализа. Наибольший коэффициент корреляции отмечается в черноземах под кленом и березой (табл. 1).

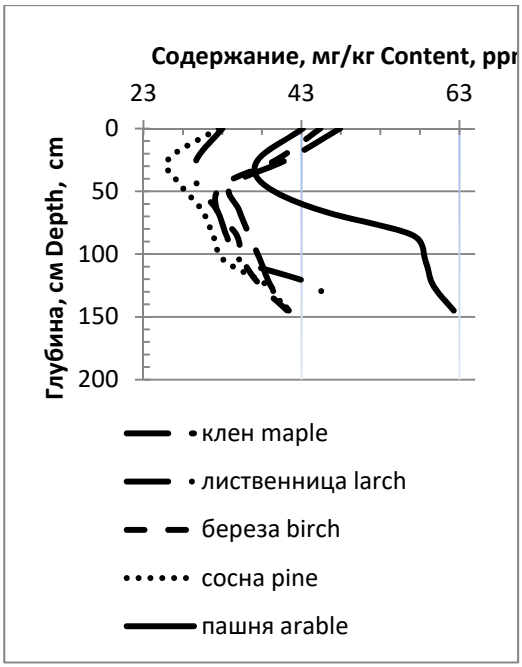


Рисунок 1. Профильное распределение валового содержания Ni в черноземах обыкновенных
Источник: собственные вычисления авторов
Figure 1. Profile distribution of the gross Ni content in ordinary chernozems
Source: authors' own calculations

В почвах лесополосы более интенсивно происходят процессы выщелачивания. Поведение металла подчиняется общей закономерности и поэтому граница накопления в почвообразующей породе заметно снижается в лесополосе по сравнению с пашней (рис. 1). В изучаемых черноземах обыкновенных валовое содержание Ni не превышает ПДК = 100 мг/кг принятых для почв черноземного ряда [6].

В слое 0-10 см отмечается следующее содержание обменных соединений Ni: клен (1,39±0,17 мг/кг) > береза (1,28±0,14 мг/кг) > лиственница (1,17±0,13 мг/кг) > сосна (1,15±0,09 мг/кг) > пашня (1,09±0,06 мг/кг). Данное распределение тесно коррелирует с содержанием гумуса (табл. 1). Содержание обменных соединений Ni в исследуемых черноземах обыкновенных характеризуется элювиальным типом распределением по профилю (рис. 2). Происходит постепенное увеличение обменного Ni вниз по почвенному профилю.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между содержанием тяжелых металлов, гумусом и pH в профиле исследуемых почв

Table 1

Correlation coefficients between the content of heavy metals, humus and pH in the profile of the studied soils

Угодье (растительность) | Field (vegetation)	Ni – гумус | Ni – humus	Ni –pH	Pb –гумус | Pb – humus	Pb – pH	Cd – гумус | Cd – humus	Cd – pH
Валовое содержание | Gross content						
пашня | arable	0,64	-0,78	0,81	-0,77	0,23	-0,20
клен | maple	0,97	-0,81	0,85	-0,80	0,21	-0,19
лиственница | larch	0,75	-0,75	0,80	-0,83	0,18	-0,15
береза | birch	0,88	-0,82	0,79	-0,79	0,15	-0,23
сосна | pine	0,71	-0,80	0,75	-0,78	0,14	-0,18
Обменные соединения | Exchange connections						
пашня | arable	0,87	-0,90	0,89	-0,91	0,22	-0,14
клен | maple	0,95	-0,91	0,88	-0,95	0,17	-0,22
лиственница | larch	0,91	-0,94	0,91	-0,99	0,14	-0,13
береза | birch	0,92	-0,97	0,90	-0,97	0,21	-0,11
сосна | pine	0,89	-0,96	0,92	-0,98	0,18	-0,21

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

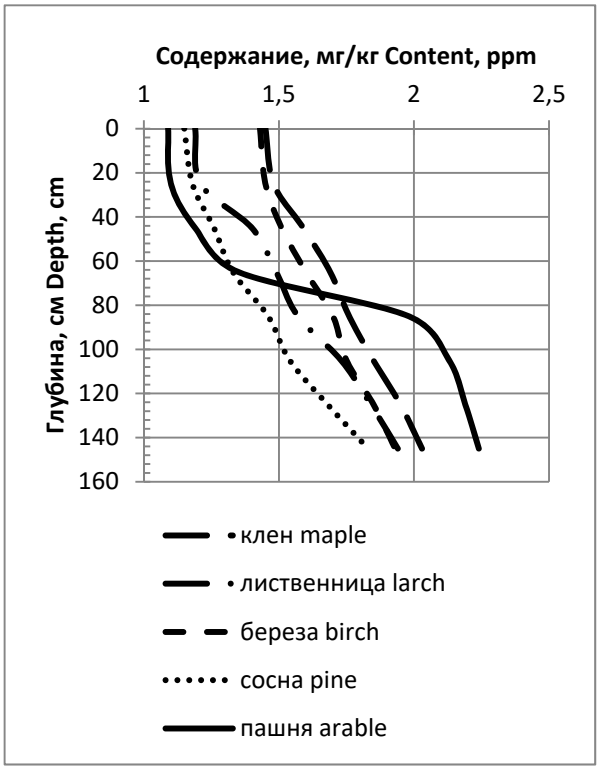


Рисунок 2. Профильное распределение обменных соединений Ni в черноземах обыкновенных

Источник: собственные вычисления авторов

Figure 2. Profile distribution of exchangeable Ni compounds in ordinary chernozems

Source: authors' own calculations

Следует отметить, что в черноземах лесополосы распределение элемента более равномерно (рис. 2), что связанно с появлением процессов выщелачивания. В целом элемент является малоподвижным, поскольку процент обменных соединений составляет (3,03±0,97 %).

Уровень содержания Pb в исследуемых почвах превышает кларк литосферы, который составляет 16 мг/кг и близок к кларку почв – 20-25 мг/кг [5]. Полученные данные по валовому содержанию Pb в изучаемых черноземах обыкновенных свидетельствуют о накоплении элемента в верхних горизонтах почв за счет взаимодействия металла с молекулами гуминовых кислот. Образуются прочные хелатные соединения. Образуется следующий ряд уменьшения по валовому содержанию Pb: клен (24,7±1,35 мг/кг) > пашня (23,9±1,87 мг/кг) > береза (21,7±1,11 мг/кг) > лиственница (18,2±1,07 мг/кг) > сосна (17,1±1,09 мг/кг).

Для профильного распределения металла характерно постепенное снижение его содержания до глубины 60-70 см (рис. 3). Далее к почвообразующей породе вновь отмечается постепенное накопление валового содержания Pb. Металл взаимодействует с илистой и коллоидной фракцией, интенсивно сорбируется сколом кристаллических решеток. Результаты корреляционного анализа показали

тесную положительную связь между профильным распределением валового Pb и гумуса (табл. 1). Валовое содержание Pb в изучаемых почвах не превышает ПДК = 30 мг/кг [6].

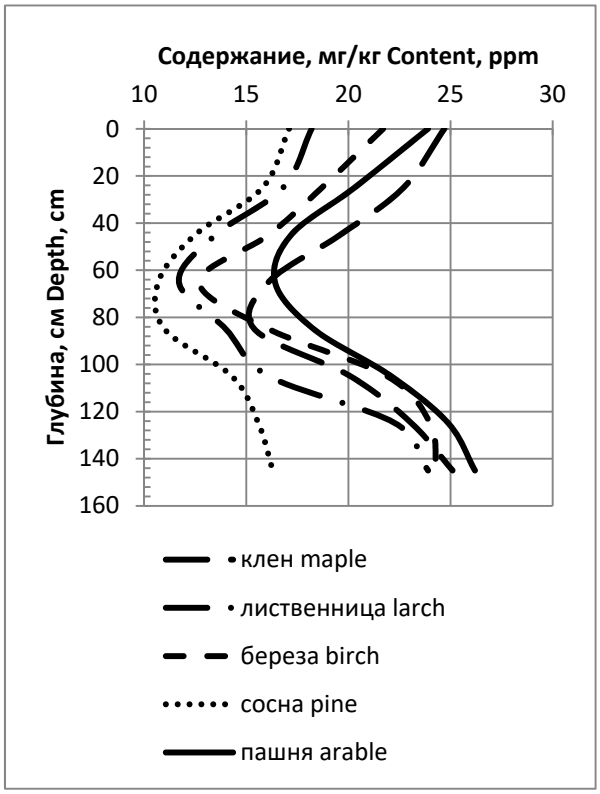


Рисунок 3. Профильное распределение валового содержания Pb в черноземах обыкновенных
Источник: собственные вычисления авторов
Figure 3. Profile distribution of the total Pb content in ordinary chernozems
Source: authors' own calculations

Концентрация обменных соединений Pb отмечается в слое 0-10 см на пашне (1,18±0,17 мг/кг) возможно, это связанно с антропогенным внесением элементы в качестве примеси в удобрениях, а также за счет обработки пахотных почв сельхозтехникой. Далее происходит уменьшение содержания обменных соединений Pb в ряду: черноземы под кленом (1,18±0,05 мг/кг) > березой (1,15±0,04 мг/кг) > сосной (1,12±0,04 мг/кг) > лиственницей (1,10±0,04 мг/кг). Как и для Ni отмечается элювиальный тип профильного распределения обменных соединений Pb с постепенным увеличением вниз к почвообразующей породе (рис. 4). Большинство соединений Pb малоподвижно, как и многие тяжелые металлы, он прочно сорбируется почвами [6]. Процент подвижности Pb не превышает 8,1 %.

Согласно полученным данным валовое содержание Cd в исследуемых черноземах обыкновенных близко к кларку почв, который составляет 0,3-0,5 мг/кг и несколько превышает кларк литосферы – 0,1 мг/кг [5]. Cd имеет меньшее сродство к органическому веществу почв по сравнению с Ni и Pb.

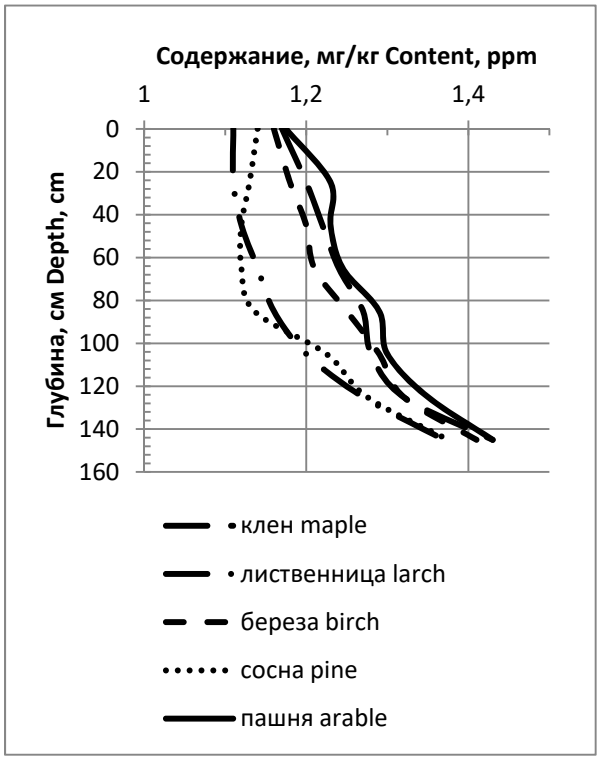


Рисунок 4. Профильное распределение обменных соединений Pb в черноземах обыкновенных
Источник: собственные вычисления авторов
Figure 4. Profile distribution of exchangeable Pb compounds in ordinary chernozems
Source: authors' own calculations

Миграционные особенности Cd не зависят от режима увлажнения, окислительно-восстановительных условий, а также соединений Fe, Mn [6]. Вследствие этого валовое содержание Cd равномерно распределяется по профилю черноземов обыкновенных Каменной степи (рис. 5), с незначительным увеличением к почвообразующей породе 0,48±0,03 мг/кг. Так же как Ni и Pb, Cd прочно сорбируется илистой и коллоидной фракцией почв. Результаты корреляционного анализа (табл. 1) показали отсутствие связи между профильным распределением валового содержания Cd с гумусом и pH. Полученные данные по валовому

содержанию Cd в исследуемых черноземах не превышают ПДК = 1 мг/кг [6].

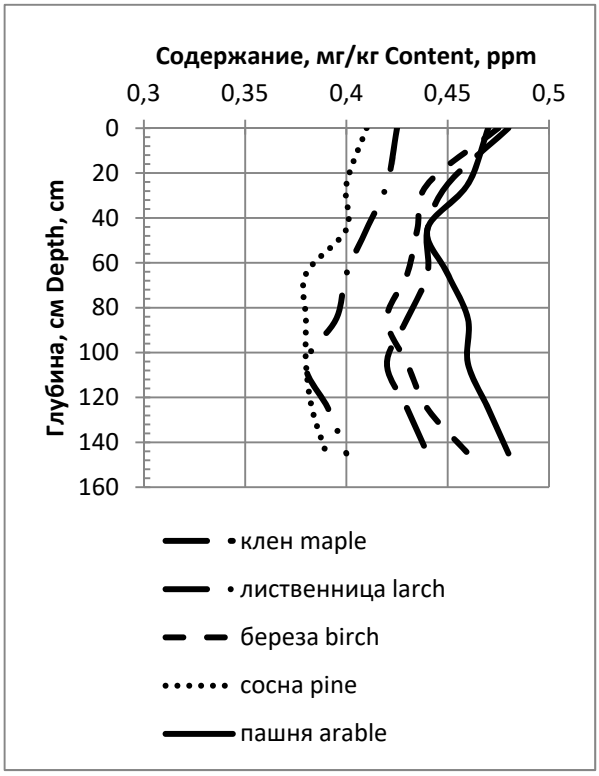


Рисунок 5. Профильное распределение валового содержания Cd в черноземах обыкновенных
Источник: собственные вычисления авторов
Figure 5. Profile distribution of total Cd content in ordinary chernozems
Source: authors' own calculations

Содержание обменных соединений Cd в исследуемых черноземах колеблется в пределах 0,011-0,059 мг/кг. Обменные соединения металла также относительно равномерно распределяются в профиле изучаемых почв (рис. 6). Данное положение подтверждается результатами корреляционного анализа (табл. 1). Обменные соединения Cd более подвижны, чем соединения Ni и Pb. Их процент подвижности достигает 10,4±1,01 %. Данное явление объясняется меньшим сродством к органическим веществом, а также большей растворимостью их соединений [6].

Следует отметить, что доступность тяжелых металлов и прежде всего таких опасных загрязнителей как Pb и Cd, значительно выше, чем их переход в вытяжку ацетатно-аммонийного буфера [13]. Cd очень часто является сопутствующим элементом органических и минеральных удобрений. Входит в их состав в качестве примеси. Но его вынос растениями [10] и миграция по профилю гораздо выше, чем внесение. Создается так называемый отрицательный баланс Cd [4]. Поэтому загрязнения данным элементом почвенного покрова не происходит.

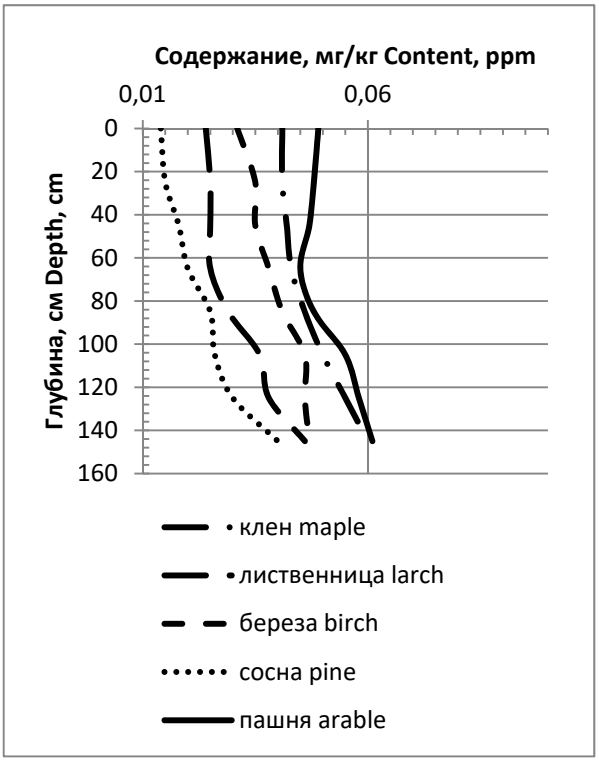


Рисунок 6. Профильное распределение обменных соединений Cd в черноземах обыкновенных
Источник: собственные вычисления авторов
Figure 6. Profile distribution of exchangeable Cd compounds in ordinary chernozems
Source: authors' own calculations

Коэффициент вариации, определяющий пространственные различия в содержании тяжелых металлов выявил пространственную неоднородности в черноземах лесополосы. Как и в случае с гумусом и pH, распашка приводит к выравниванию пространственных различий в содержании ТМ (V=3±0,5 %). Что касается лесополосы, то различные древесные породы вносят пространственную неоднородность в содержание тяжелых металлов (V=17±1,12 %).

Заключение

Черноземы обыкновенные Каменной степи, расположенные под пашней и лесополосой достоверно отличаются по морфологическим признакам, по содержанию гумуса, pH, а также по валовому

содержанию и обменным соединениям Ni, Pb и Cd. Статистический анализ полученных данных содержания гумуса и pH среды по определению пространственных различий между пашней и лесополосой показал закономерное уменьшение коэффициента вариации от лесополосы до пашни. Такое явление объясняется тем, что в результате распашки происходит выравнивание пространственных различий данных почвенных свойств. В лесополосе древесная растительность вносит пространственную неоднородность не только в содержание гумуса и pH почвенного раствора, но и в содержание тяжелых металлов.

Валовое содержание Ni и Pb в профиле исследуемых почв характеризуются накоплением в верхнем гумусовом горизонте и в почвообразующей породе. В черноземах лесополосы отмечается более глубокое профильное выщелачивание исследуемых тяжелых металлов. Содержание обменных соединений Ni и Pb в профиле исследуемых черноземов характеризуется элювиальным типом распределения. Для профильного распределения валового содержания Cd и его обменных соединений характерно равномерное распределение в профиле черноземов обыкновенных Каменной степи. Полученные коэффициенты корреляции свидетельствуют о тесной взаимосвязи между профильным распределением гумуса, pH и валовым содержанием и подвижными соединениями Ni и Pb. Корреляционной зависимости между почвенными свойствами и распределением Cd не обнаружено.

Список литературы

1. Завьялова Н. Е. Гумус и азот дерново-подзолистой почвы различных сельскохозяйственных угодий Пермского края. Почвоведение. 2016;11:1347-1354. Режим доступа: DOI: 10.7868/S0032180X16110113.
2. Иванов А. В., Браун М., Замолодчиков Д. Г., Лынов Д. В., Панфилова Е. В. Лесные подстилки как звено цикла углерода хвойно-широколиственных насаждений южного Приморья. Почвоведение. 2018;10:1226-1233. Режим доступа: DOI: 10.1134/S0032180X18100052.
3. Кирюшин В. И. Экологические функции ландшафта. Почвоведение. 2018;1:17-25. Режим доступа: DOI: 10.7868/S0032180X18010021
4. Лукин С. В., Селюкова С. В. Экологическая оценка содержания кадмия в почвах и сельскохозяйственных растениях юго-западной части Центрально-Черноземных областей России. Почвоведение. 2018;10S:3-9. Режим доступа: DOI:10.1134/S0032180X18120079.
5. Плеханова И. О., Золотарева О. А., Тарасенко И. Д., Яковлев А. С. Оценка экотоксичности почв в условиях загрязнения тяжелыми металлами. Почвоведение. 2019;10:1243-1258. Режим доступа: DOI: 10.1134/S0032180X19100083.
6. Чернова О. В., Безуглова О. С. Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв. Почвоведение. 2019;8:1015-1026. Режим доступа: DOI: 10.1134/S0032180X19080045.
7. Чертов О. Г., Надпорожская М. А. Формы гумуса лесных почв: концепции и классификации. Почвоведение. 2018;10:1202-1214. Режим доступа: DOI: 10.1134/S0032180X18100027.
8. Щеглов Д. И., Громовик А. И., Горбунова Н. С. Основы химического анализа почв. 2019:332. Режим доступа: ISBN 978-5-9273-2738-6.
9. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Burachevskaya M. V., Bauer T. V., Sushkova S. N. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. MethodsX. 2018; 5:217-226. Режим доступа: DOI: 10.1016/j.mex.2018.02.007.
10. Neaman A., Robinson B., Minkina T. M., Vidal K., Mench M., Krutyakov Y. A., Shapoval O. A. Feasibility of metal(loid) phytoextraction from polluted soils: the need for greater scrutiny. Environmental Toxicology and Chemistry. 2020;39(8):1469-1471. Режим доступа: DOI: 10.1002/etc.4787.
11. Olson K. R., Gennadiev A. N. Dynamics of soil organic carbon storage and erosion due to land use change (Illinois, USA). Eurasian Soil Science. 2020;53(4);436-445. Режим доступа: DOI: 10.1134/S1064229320040122.

12. *Pashayan S. A., Sindireva A. V., Boev V. A.* Features of accumulation of trace elements in the soil-honey plants system in the Tyumen region IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020: 62044. Режим доступа: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/548/6/062044

13. Vodyanitskii Y., Minkina T., Bauer T. Method for calculation the selectivity of reagents extracting heavy metals mobile compounds from soil. Applied Geochemistry. 2020;116: 104570. Режим доступа: DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104570.

14. Zanella A., Ponge J.-F., Hager H., Pignatti S., Galbraith J., Chertov O., Andreetta A., De Nobili M. Alteration process during the post-agricultural restoration of luvisols of the temperate broad-leaved forest in Russia. Catena. 2018;171:602-612. Режим доступа: DOI: 10.1016/j.catena.2018.08.004

References

1. Zav'yalova N. E. Gumus i azot dernovo-podzolistoi pochvy razlichnykh sel'skokhozyaistvennykh ugodii Permskogo kraya. Pochvovedenie. 2016;11:1347-1354. (In Russ.). URL: http://doi.org/10.7868/S0032180X16110113.

2. Ivanov A. V., Braun M., Zamolodchikov D. G., Lynov D. V., Panfilova E. V. Lesnye podstilki kak zveno tsikla ugleroda khvoino-shirokolistvennykh nasazhdenii yuzhnogo Primor'ya. Pochvovedenie. 2018;10:1226-1233. (In Russ.). URL: http://doi.org/10.1134/S0032180X18100052.

3. Kiryushin V. I. Ehkologicheskie funktsii landshafta. Pochvovedenie. 2018;1:17-25. (In Russ.). URL: http://doi.org/10.7868/S0032180X18010021.

4. Lukin S. V., Selyukova S. V. Ehkologicheskaya otsenka soderzhaniya kadmiya v pochvakh i sel'skokhozyaistvennykh rasteniyakh yugo-zapadnoi chasti Tsentral'no-Chernozemnykh oblastei Rossii. Pochvovedenie. 2018;10S:3-9. (In Russ.). URL: http://doi.org/10.1134/S0032180X18120079.

5. Plekhanova I. O. Zolotareva O. A., Tarasenko I. D., Yakovlev A. S. Otsenka ehkotoksichnosti pochv v usloviyakh zagryazneniya tyazhelymi metallami. Pochvovedenie. 2019;10:1243-1258. (In Russ.). URL: http://doi.org/10.1134/S0032180X19100083.

6. Chernova O. V., Bezuglova O. S. Opyt ispol'zovaniya dannykh fonovykh kontsentratsii tyazhelykh metallov pri regional'nom monitoringe zagryazneniya pochv. Pochvovedenie. 2019;8:1015-1026. (In Russ.). URL: http://doi.org/10.1134/S0032180X19080045.

7. Chertov O. G., Nadporozhskaya M. A. Formy gumusa lesnykh pochv: kontseptsii i klassifikatsii. Pochvovedenie. 2018;10:1202-1214. (In Russ.). URL: http://doi.org/10.1134/S0032180X18100027.

8. SHCHeglov D. I., Gromovik A. I., Gorbunova N. S. Osnovy himicheskogo analiza. 2019: 332. (In Russ.). URL: ISBN 978-5-9273-2738-6.

9. Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Burachevskaya M. V., Bauer T. V., Sushkova S. N. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. MethodsX. 2018;5:217-226. URL: http://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007.

10. Neaman A., Robinson B., Minkina T. M., Vidal K., Mench M., Krutyakov Y. A., Shapoval O. A. Feasibility of metal(loid) phytoextraction from polluted soils: the need for greater scrutiny. Environmental Toxicology and Chemistry. 2020;39(8):1469-1471. URL: http://doi.org/10.1002/etc.4787.

11. Olson K. R., Gennadiev A. N. Dynamics of soil organic carbon storage and erosion due to land use change (Illinois, USA). Eurasian Soil Science. 2020;53(4);436-445. URL: http://doi.org/10.1134/S1064229320040122.

12. Pashayan S. A., Sindireva A. V., Boev V. A. Features of accumulation of trace elements in the soil-honey plants system in the Tyumen region IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies.

Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020: 62044. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/548/6/062044

13. Vodyanitskii Y., Minkina T., Bauer T. Method for calculation the selectivity of reagents extracting heavy metals mobile compounds from soil. Applied Geochemistry. 2020;116: 104570. URL: http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104570.

14. Zanella A., Ponge J.-F., Hager H., Pignatti S., Galbraith J., Chertov O., Andreetta A., De Nobili M. Alteration process during the post-agricultural restoration of luvisols of the temperate broad-leaved forest in Russia. Catena. 2018;171:602-612. URL: http://doi. 10.1016/j.catena.2018.08.004

Сведения об авторах

✉ *Крамарева Татьяна Николаевна* – кандидат биол. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-7363-1215, e-mail: tkramarewa@mail.ru.

Горбунова Надежда Сергеевна, кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7986-8106, e-mail: vilian@list.ru.

Куликова Елена Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3106-7422, e-mail: e-mail: melior-agronomy@inbox.ru.

Information about the authors

✉ *Tatyana N. Kramareva* – Cand.Ssci (Bio) assistant professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, Russian Federation, 394087, https://orcid.org/ 0000-0001-7363-1215, e-mail: kramarewa@mail.ru.

Nadezhda S. Gorbunova – Cand.Ssci (Bio) assistant professor, Voronezh State University, Universitetskaya square, 1, Voronezh city, Russian Federation, 394018, https://orcid.org/0000-0002-7986-8106, e-mail: vilian@list.ru.

Elena V. Kulikova – Cand.Ssci (Bio) assistant professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, str. Michurina, 1, Voronezh city, Russian Federation, 394087, https://orcid.org/0000-0002-3106-7422, e-mail: melior-agronomy@inbox.ru.

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7

УДК 630.43:630.812

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТВЕРДОСТИ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ, ПОВРЕЖДЕННОЙ СИЛЬНЫМ НИЗОВЫМ И ПОВАЛЬНЫМ ВЕРХОВЫМ ПОЖАРОМ

Светлана Н. Снегирева[1], svetka-sneg@yandex.ru, 0000-0003-4371-2270
Алексей Д. Платонов[1], aleksey66@yandex.ru, 0000-0001-5941-6287
Александра В. Киселева[1], avk50@yandex.ru, 0000-0002-5960-6133
Екатерина В. Кантиева[1], ekantieva@mail.ru 0000-0001-8352-1941

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

Пожары оказывают огромный ущерб лесам. Степень повреждения насаждений зависит от вида пожара, который во многом определяется климатическими условиями, рельефом местности, возрастом насаждений и т.д. Наибольший урон насаждениям наносит сильный низовой и повальный верховой пожар. Товарная стоимость такой древесины минимальная. В древесине поврежденной пожаром протекают процессы смолообразования. Степень засмоления древесины зависит от жизнеспособности камбия. Тонкая кора молодых деревьев не обеспечивает достаточной защиты камбия от теплового воздействия и деревья быстро погибают. Толстый слой коры частично защищает камбий и древесине активируются процессы смолообразования, которые могут протекать длительный промежуток времени. Воздействие высокой температуры, в том числе и её засмоление, оказывает существенное влияние на физико-механические свойства древесины. Большое практическое значение имеют сведения о качестве древесины, поврежденной пожаром и их изменчивости при длительном хранении или в процессе эксплуатации. Целью исследования является установление статической торцовой твердости древесины сосны, поврежденной сильным низовым и повальным верховым пожаром, после длительного хранения в комнатных условиях. Установлено, что в процессе хранения в течение 10 лет статическая торцовая твердость засмоленной древесины сосны увеличилась в 1,9-2,2 раза, по сравнению с показателями на момент рубки древесины после пожара и превосходит показатели неповрежденной древесины сосны у деревьев диаметром ствола 22-26 см на 42,5 % и диаметром 50-56 см на 67,7 %. Степень засмоления и показатели прочности древесины выше у деревьев с более толстой корой.

Ключевые слова: древесина сосны, статическая торцовая твердость, пожар, засмоление древесины, ствол, ядро, заболонь

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Изменчивость твердости древесины сосны, поврежденной сильным низовым и повальным верховым пожаром / С. Н. Снегирева, А. Д. Платонов, А. В. Киселева, Е. В. Кантиева // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 79–87. – *Библиогр.: с. 85–87 (11 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7.

Поступила: 05.11.2021 ***Принята к публикации***: 23.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

VARIABILITY OF THE HARDNESS OF PINE WOOD DAMAGED BY STRONG GRASSROOTS AND RAMPANT RIDING FIRE

Svetlana N. Snegireva[1], svetka-sneg@yandex.ru, 0000-0003-4371-2270
Aleksei D. Platonov[1], aleksey66@yandex.ru, 0000-0001-5941-6287
Aleksandra V. Kiseleva[1], avk50@yandex.ru, 0000-0002-5960-6133
Ekaterina V. Kantieva[1], ekantieva@mail.ru 0000-0001-8352-1941

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

Abstract

Fires cause huge damage to forests. The degree of damage to plantings depends on the type of fire, which is largely determined by climatic conditions, terrain, age of plantings, etc. The greatest damage to plantings is caused by a strong grassroots and rampant riding fire. The commodity value of such wood is minimal. Resin formation processes occur in wood damaged by fire. The degree of tarring of the wood depends on the viability of the cambium. The thin bark of young trees does not provide sufficient protection of cambium from heat exposure and trees die quickly. A thick layer of bark partially protects the cambium and the resin formation processes are activated in the wood, which can take a long period of time. The effect of high temperature, including its tarring, has a significant impact on the physical and mechanical properties of wood. Information about the quality of wood damaged by fire and their variability during long-term storage or during operation is of great practical importance. The aim of the study is to establish the static end hardness of pine wood damaged by a strong grassroots and rampant riding fire, after long-term storage in room conditions. It was found that during storage for 10 years, the static end hardness of tarred pine wood increased by 1.9-2.2 times, compared with the indicators at the time of cutting wood after a fire and exceeds the indicators of intact pine wood in trees with a trunk diameter of 22-26 cm by 42.5% and a diameter of 50-56 cm by 67.7%. The degree of tarring and the strength of wood are higher in trees with thicker bark.

Keywords: pine wood, static end hardness, fire, tarring of wood, trunk, core, sapwood

Acknowledgments: The authors are grateful to the reviewers for their contributions to the peer review of the article.

***For citation*:** Snegireva S. N., Platonov A. D., Riseleva A. V., Kantieva E. V. (2021) Variability of the hardness of pine wood damaged by a strong grassroots and rampant riding fire. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 79-87 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7.

Received: 05.11.2021 ***Revised***: 07.12.2021 ***Accepted***: 22.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

За последнее десятилетие в России произошло большое количество пожаров. В результате этих пожаров выгорели большие площади лесов. В Воронежской области на территории УОЛ ВГЛТУ выгорело несколько тысяч гектар леса.

Анализ повреждения насаждений показал, что вид пожара во многом зависит от климатических условий, рельефа местности, а также от возраста насаждений [1]. В насаждениях со средним диаметром стволов деревьев 26 см преобладал сильный низовой и повальный верховой пожар. Это вид пожара, при котором насаждениям наносится наибольший урон - полностью выгорает подлесок и кроны деревьев [1, 2]. Нагар присутствует по всей высоте ствола (рис 1). Внешний вид и характер повреждений стволовой древесины резко понижает её

товарную стоимость. Древостои с таким и повреждениями относят к первой группе гарей [2].

При данном виде пожара наибольшее воздействие высокой температуры приходится на заболонную древесину. Интенсивность воздействия высокой температуры несколько выше в комлевой и вершинной, чем в средней части ствола. В связи с чем, прочностные свойства древесины в стволе дерева после пожара будут различны в зависимости от вида пожара [3].

Рисунок 1 .Древостой сосны, поврежденный сильным низовым и повальным верховым пожаром
Figure 1. A pine stand damaged by a strong grassroots and rampant riding fire
Источник: Собственные фото авторов
Source: Authors ' own photos

Под воздействием высокой температуры и в присутствии влаги происходит ряд физико-химических процессов в древесине, оказывающих существенное влияние на её физико-механические свойства. Изменчивость физико-механических свойств оказывает существенное влияние на качество и эксплуатационные свойства пиломатериалов, изготавливаемых из этой древесины [4, 5], а также на технологические процессы сушки, пропитки и механической обработки [6, 7].

Физико-механические свойства древесины стоящей на корню после пожара снижаются в лесах севера европейской части России, а древостои сохраняют свою жизнеспособность [8, 9]. В средней и южной европейской части России древостои из хвойных пород погибают при незначительном повреждении пожаром в течение 1,5-2,0 лет после пожара, а поврежденная древесина уже не может быть использована как конструкционный или технологический материал [10]. Имеются сведения о сохранении качественных показателей древесины, поврежденных пожарами в зоне Южного Урала и Заволжья.

В древесине стоящей на корню длительное время после пожара активно протекает процесс её засмоления. Смолистость древесины в течение первых лет после пожара повышается как по высоте ствола, так и по радиусу в среднем в 2,0-2,5 раза. Продолжительность и интенсивность процесса зависит от степени повреждения древесины [8].

Древесина, заготовленная в первое время после пожара, в большей степени сохраняет свои прочностные свойства [10]. Однако, в научной литературе отсутствуют сведения о качественных показателях поврежденной древесины и характере их изменения при длительном хранении или использовании в различных изделиях.

Одним из основных показателей технических свойств древесины являются её твердость. Показатель твердости определяет затраты энергии на механическую или ручную обработку древесины [1, 2, 11]. В связи с чем, целью исследований являлось установление статической торцовой твердости древесины сосны, поврежденной сильным низовым и повальным верховым пожаром, после длительной выдержки в течение 10 лет. Сведения о прочностных свойствах древесины, поврежденной пожаром и их изменчивости, имеют большую практическую значимость. На практике древесина, поврежденная пожаром, имеет невысокую товарную стоимость по причине внешнего вида обгоревшей древесины и отсутствия сведений о её эксплуатационных свойствах.

Материалы и методы

Исследования выполнены на древесине сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*), произрастающей на территории учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ Воронежской области, поврежденной

сильным низовым и повальным верховым пожаром 2010 году. Образцы древесины были заготовлены в 10 квартале УОЛ ВГЛТУ через 2 месяца после пожара. Для исследований были отобраны деревья с диаметром на высоте груди 22-26 см и 50-56 см. Из каждого ствола дерева были выпилены срезы древесины толщиной 10,0 см из комлевой, средней и вершинной части ствола. Из каждого среза были вырезаны заготовки шириной 60 мм, проходящие через сердцевину в двух взаимно перпендикулярных направлениях [3]. После выпиловки образцы были выдержаны в комнатных условиях до достижения устойчивой влажности. Статическую торцовую твердость древесины определяли через два, три месяца после пожара и после выдержки в комнатных условиях в течение 10 лет, согласно ГОСТ 16483.17-81 «Метод определения статической твердости» по радиусу ствола на участках 0,1R, 0,25R, 0,5R, 0,75R, 0,9R. По высоте ствола у деревьев диаметром до 26 см на отметках 1 м, 3 м, 5 м, 7,5 м и 10 м, у деревьев диаметром до 50-56 см на отметках 1 м, 5 м, 9 м, 12 м и 16 м. Влажность древесины на момент испытания определяли согласно ГОСТ 16483.7-71 «Древесина. Методы определения влажности». Взвешивание образцов производили на весах марки «OHAUS» AR 5120 с погрешностью не более 0,01 г (Россия). Полученные значения статической торцовой твердости древесины сосны были пересчитаны на нормализованную влажность 12 % по ГОСТ 16483.7-71.

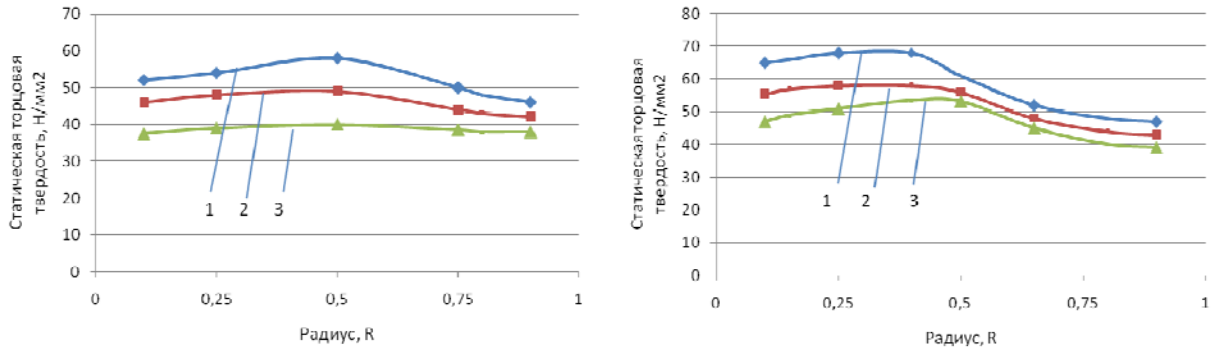
Результаты и обсуждение

Результаты определения средней статической торцовой твердости древесины сосны по радиусу ствола повреждения сильным низовым и повальным верховым пожаром после выдержки в комнатных условиях в течение 10 лет представлены на рис. 2.

Анализ результатов исследования статической торцовой твердости в деревьях диаметром до 26 см показывает, что наибольшую величину статическая торцовая твердость достигает в комлевой части ствола на отметке 0,5R и составляет 58,0 Н/мм^2, в средней 49,1 Н/мм^2 и вершинной 40,1 Н/мм^2. Ближе к сердцевинной и периферийной части радиуса ствола величина статической торцовой твердости понижается и наименьшее её значение отмечено в заболонной древесине на отметке радиуса 0,9R и составила в комлевой части ствола 46,0 Н/мм^2, средней - 42,2 Н/мм^2 и вершинной - 38,1 Н/мм^2. Наибольший перепад статической торцовой твердости по радиусу ствола отмечен в комлевой части ствола и составил 20, 7 %, а наименьший в вершинной – около 5,0 % (рис. 2, а).

В деревьях диаметром 50-56 см наибольшую величину статическая торцовая твердость достигает в комлевой части ствола и составляет 58,0 Н/мм^2 на отметке 0,4R и, в средней - 49,1 Н/мм^2 на отметке 0,45R и вершинной - 40,1 Н/мм^2 на отметке 0,5 R. Ближе к внутренней части ствола происходит незначительное понижение статической торцовой твердости в стволе в среднем на 4,4-6,3 %. Понижение торцовой твердости к периферийной части радиуса ствола происходит более существенно и на отметке радиуса 0,9R и составила в комлевой части ствола 47,0 Н/мм^2, средней - 43,2 Н/мм^2 и вершинной - 38,3 Н/мм^2. Наибольший перепад статической твердости по радиусу отмечен в комлевой части ствола и составил 30, 9 %, а наименьший в средней – 25,9 % (рис. 2, б). Стоит отметить, что колебания численных значений статической торцовой твердости древесины в периферийной части ствола на отметке 0,9R у деревьев диаметром 22-26 см и 50-56 см незначительны и не превышают 2,5 %.

По высоте ствола величина статической торцовой твердости древесины уменьшается (рис. 2). Понижение статической торцовой твердости у деревьев диаметром 22-26 см во внутренней части ствола составляет 28-31 %, в периферийной части около 21 %, у деревьев диаметром 50-56 см понижение статической твердости во внутренней и периферийной части ствола составляет в среднем 17-22 %. Меньший перепад статической твердости древесины по высоте ствола деревьев диаметром 50-56 см обусловлен более сильным засмолением древесины.



а б

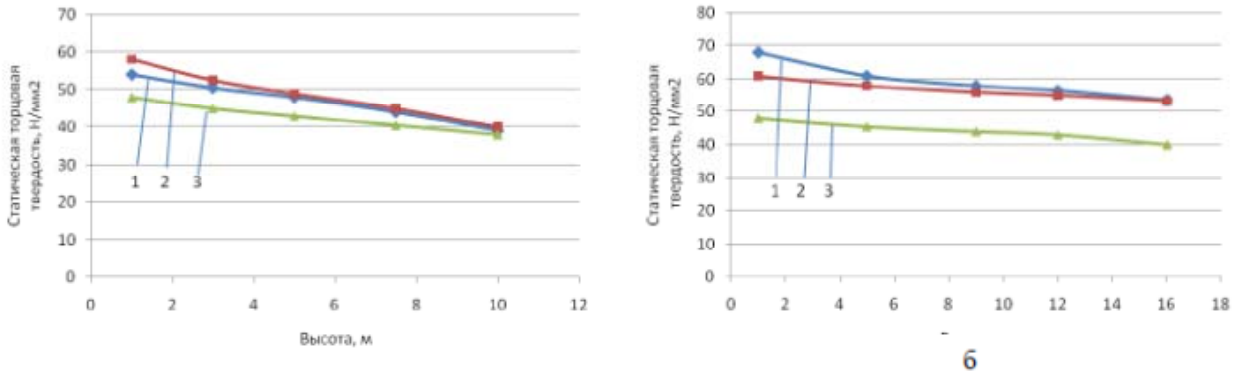
а – деревья диаметром до 26 см; б – деревья диаметром до 56 см; 1 , 2, 3 – статическая торцовая твердость в комлевой, средней и вершинной частях ствола

Рисунок 2. Статическая торцовая твердость древесины сосны по радиусу ствола после выдержки в комнатных условиях в течение 10 лет (при нормализованной влажности)

Figure 2. Static end hardness of pine wood along the trunk radius after exposure in room conditions for 10 years

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors ' own calculations



б

а – деревья диаметром до 26 см; б – деревья диаметром до 56 см; 1, 2, 3 – статическая твердость по радиусу на отметке 0,25R, 05R и 0.9R

Рисунок 3. Статическая твердость древесины сосны, поврежденной пожаром по высоте ствола и после выдержки в комнатных условиях в течение 10 лет (при нормализованной влажности)

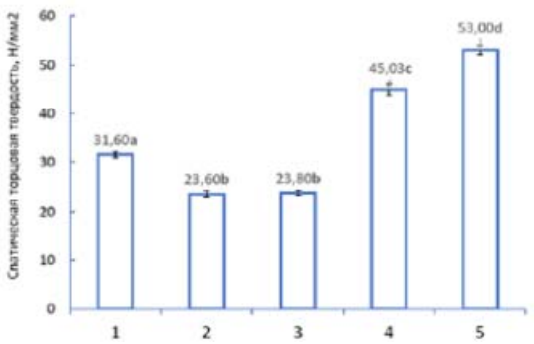
Figure 3. Static hardness of pine wood damaged by fire along the trunk height and after exposure in room conditions for 10 years

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors ' own calculations

После пожара в 2010 году средняя статическая твердость древесины, поврежденной сильным низовым и повальным верховым пожаром, составляла в среднем через два месяца после пожара 23,6± 0,58 Н/мм^2, а через 3 месяца 23,8± 0,53 Н/мм^2 независимо от возраста и диаметра деревьев. После выдержки древесины в комнатных условиях в течение 10 лет средняя статическая торцовая твердость древесины сосны у деревьев диаметром 20-26 см повысилась в среднем в 1,9 раза и составила 45,03± 1,23 Н/мм^2, у деревьев диаметром 50-56 см повысилась в среднем в 2,2 раза и составила 53,0± 0,96 Н/мм^2 (рис. 3). После выдержки древесины, поврежденной пожаром в течение 10 лет значение её статической торцовой твердости превысили показатель для неповрежденной древесины равный

31,6± 0,62 Н/мм^2, у деревьев с диаметром ствола 20-26 см на 42,5 % и у деревьев с диаметром ствола 50-56 см на 67,7 %.



1 – неповрежденная древесина; 2, 3 – поврежденная древесина через 2 и 3 месяца после пожара; 4, 5 – поврежденная древесина через 10 лет после пожара для деревьев диаметром 20-26 см и диаметром 50-56 см, соответственно Разные строчные буквы рядом со средними значениями указывают на статистически значимые различия по t-тесту средних при уровне p = 0,05.

Рис 3. Динамика изменения средней статической торцовой твердости образцов(N = 65) древесины сосны обыкновенной древесины сосны обыкновенной после повреждения сильным низовым и повальным верховым пожаром

Figure 3. Dynamics of changes in the samples (N=65) of average static end hardness of Scotspine wood after damage by a strong grassroots and rampant riding fire

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors ' own calculations

Анализ результатов исследования показал, что засмоление древесины оказало существенное влияние на величину статической торцовой твердости древесины. Причиной различного засмоления древесины является возраст деревьев и, как следствие этого, толщина коры.

У деревьев диаметром 50-56 см толщина коры достигает около 3,0-3,5 см. Толстый слой коры существенно понижает воздействие высокой температуры на камбий и он частично сохраняет свои функции. В результате поражения пожаром в древесине протекает процесс интенсивного смолообразовании, как реакция на воздействие высокой температуры. Процесс засмоления может протекать в поврежденном дереве до момента его рубки или гибели камбия. Деревья диаметром 22-26 см имеют кору толщиной около 4-8 мм. Небольшая толщина коры не предохраняет камбий от воздействия высокой температуры и приводит к гибели дерева после пожара.

Степень засмоления древесины выше в комлевой части ствола (рис. 4). Эти части ствола имеют наибольшую степень повреждения огнем, вследствие более длительного и интенсивного горения подлеска.

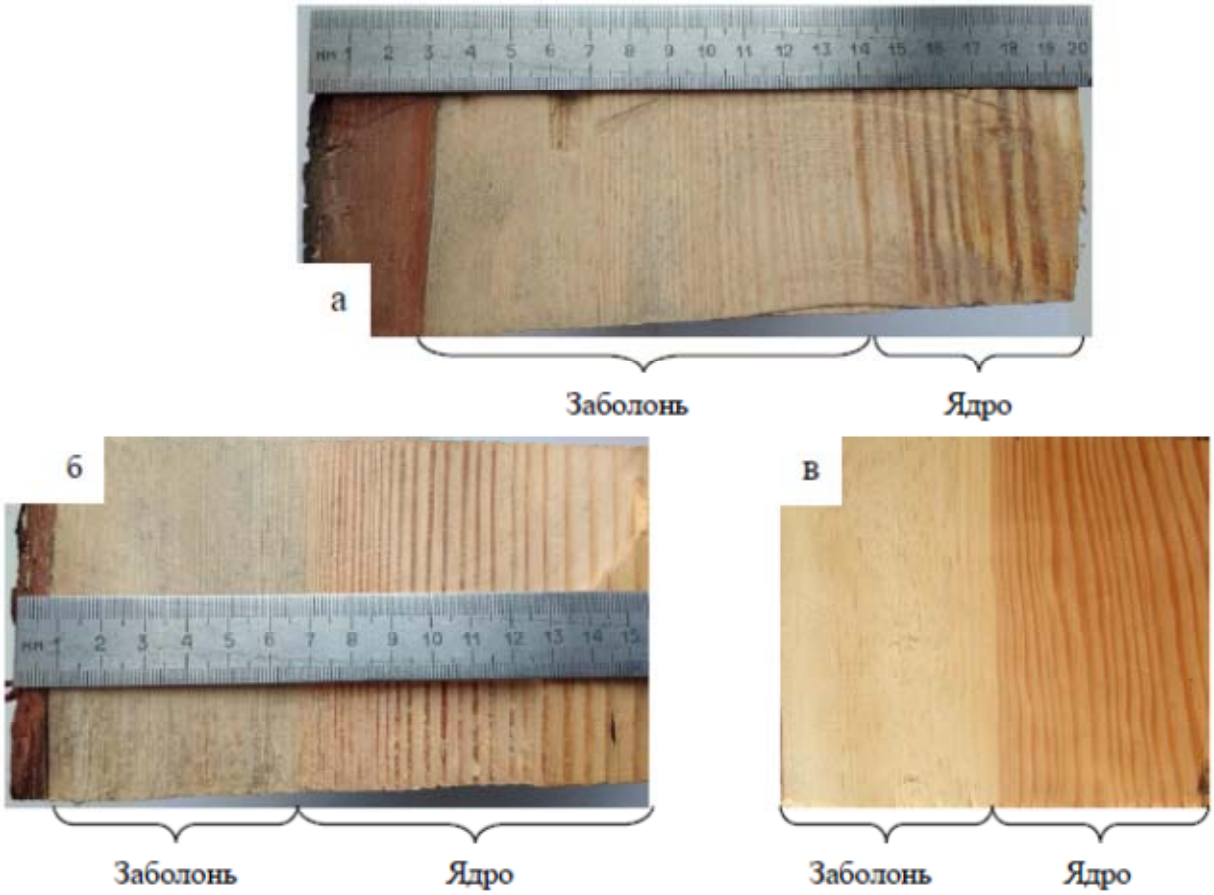
В результате длительного хранения произошло испарение летучей фракции смолы. Оставшаяся часть смолы затвердела и образовала с древесиной композит, существенно повысив прочность древесины.

Выводы

Древесина, поврежденная сильным низовым и повальным верховым пожаром имеет высокую степень засмоления. Степень засмоления повышается с возрастом дерева и толщиной его коры. В процессе длительного хранения летучая фракция смолы (скипидар) испарилась, а фракция (канифоль) образовала с древесиной прочный композит.

После выдержки древесины в комнатных условиях в течение 10 лет средняя статическая торцовая твердость древесины сосны у деревьев диаметром 20-26 см повысилась в среднем в 1,9 раза и составила 45,03 Н/мм^2, а у деревьев диаметром 50-56 см - в среднем в 2,2 раза и составила 53,0 Н/мм^2. Показатель статической торцовой твердости у деревьев с диаметром ствола 20-26 см после выдержки в течение 10 лет выше на 42,5 %, а у деревьев с диаметром ствола 50-56 см на 67,7 %, по сравнению с неповрежденной древесиной (31,6 Н/мм^2).

Древесина сосны, поврежденная сильным низовым и повальным верховым пожаром после заготовки, имеет невысокую товарную стоимость, но сохраняет высокие прочностные свойства. Высокая степень засмоления древесины позволяет использовать её в изделиях и конструкциях эксплуатируемых на открытом пространстве.



а, б – комлевая часть ствола дерева диаметром 56 см и 26 см, соответственно, в – неповрежденная древесина сосны

Рисунок. 4.Древесина сосны, поврежденная сильным низовым и повальным верховым пожаром

Figure 4. Pine wood damaged by a strong grassroots and rampant riding fire

Источник: Собственные фото авторов

Source: Authors ' own photos

Список литературы

1. Молчанов А. А. Влияние лесных пожаров на древостой. Тр. Ин-та леса. М. : Изд-во АН СССР, 1954. Т. XVI. С. 314–335.

2. Курьянова Т. К., Платонов А. Д., Макаров А. В. Прочность древесины сосны после воздействия пожара (2010 года УОЛ ВГЛТА, Воронеж). Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВПО КГТУ. Администрация Костромской области, Департамент образования и науки, Международная академия наук о древесине (ИАВС), Региональный координационный совет по современным проблемам древесиноведения, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса», ФГБОУ ВПО «Костромской государственный технологический университет». 2012. С. 20-22.

3. Макаров А.В. Технические качества древесины пораженной различными видами пожара. Лесотехнический журнал. 2011. № 4. С. 14-18.

4. Tumenjargal B., Ishiguri F., Takahashi, Y. et al. Bending properties of dimension lumber produced from Siberian larch (Larix sibirica) in Mongolia. *J Wood Sci* 66, 17 (2020). https://doi.org/10.1186/s10086-020-01863-6

5. Ramage M.N., Burridge H., Busse-Wicher M. et al. (2017) The wood from the trees: the use of timber in construction. Renew Sustain Energy Rev 68:333–359.

6. Jang E.S., Yuk J.H., Kang C.W. An experimental study on change of gas permeability depending on pore structures in three species (hinoki, Douglas fir, and hemlock) of softwood. *J Wood Sci* 66, 78 (2020). https://doi.org/10.1186/s10086-020-01925-9/.

7. Weng, X., Zhou, Y., Fu, Z. et al. Effects of microwave pretreatment on drying of 50 mm-thickness Chinese fir lumber. *J Wood Sci* **67,** 13 (2021). https://doi.org/10.1186/s10086-021-01942-2

8. Мелехов С. И. Влияние пожаров на лес. М.-Л.: Гос. лесотехн. изд-тво. 1948. 126 с.

9. Демаков Ю. П., Калинин К. К. Лесоводство. Ведение хозяйства в лесах пораженных пожарами : учеб. пособие. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 135 с.

10. Макаров А. В. Оценка технического качества древесины сосны, поврежденной пожаром : автореферат дис. ... канд. технических наук : 05.21.05 / Макаров Андрей Васильевич; [Место защиты: Воронеж. гос. лесотехн. акад.]. Воронеж, 2013. 16 с.

11. Hao X., Wang Q., Wang Y. et al. The effect of oil heat treatment on biological, mechanical and physical properties of bamboo. *J Wood Sci* **67,** 13 (2021). https://doi.org/10.1186/s10086-021-01942-2.

References

1. Molchanov, A. A. Vliyanie lesnyh pozharov na drevostoj [The impact of forest fires on the tree stand. Tr. In-ta lesa. M. : Izd-vo AN SSSR, 1954. T. XVI. P. 314–335. (in Russian).

2. Kur'yanova T. K., Platonov A. D., Makarov A. V. Prochnost' drevesiny sosny posle vozdejstviya pozhara (2010 goda UOL VGLTA, Voronezh) [The strength of pine wood after exposure to fire (2010 UOL VGLTA, Voronezh)]. Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa. materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, posvyashchennoj 50-letiyu kafedry mekhanicheskoj tekhnologii drevesiny FGBOU VPO KGTU. Administraciya Kostromskoj oblasti, Departament obrazovaniya i nauki, Mezhdunarodnaya akademiya nauk o drevesine (IAVS), Regional'nyj koordinacionnyj sovet po sovremennym problemam drevesinovedeniya, FGBOU VPO «Moskovskij gosudarstvennyj universitet lesa», FGBOU VPO «Kostromskoj gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet». 2012. S. 20-22 (in Russian).

3. Makarov A. V. Tekhnicheskie kachestva drevesiny porazhennoj razlichnymi vidami pozhara [Technical qualities of wood affected by various types of fire]. Lesotehnicheskii zhurnal [*Forest Engineering Journal*]. 2011. № 4. pp. 14-18.

4. Tumenjargal B., Ishiguri F., Takahashi Y. et al. Bending properties of dimension lumber produced from Siberian larch (Larix sibirica) in Mongolia. *J Wood Sci* 66, 17 (2020). https://doi.org/10.1186/s10086-020-01863-6

5. Ramage M.N., Burridge H., Busse-Wicher M. et al. (2017) The wood from the trees: the use of timber in construction. Renew Sustain Energy Rev 68:333–359.

6. Jang E.S., Yuk J.H., Kang C.W. An experimental study on change of gas permeability depending on pore structures in three species (hinoki, Douglas fir, and hemlock) of softwood. *J Wood Sci* 66, 78 (2020). https://doi.org/10.1186/s10086-020-01925-9/.

7. Weng, X., Zhou, Y., Fu, Z. et al. Effects of microwave pretreatment on drying of 50 mm-thickness Chinese fir lumber. *J Wood Sci* **67,** 13 (2021). https://doi.org/10.1186/s10086-021-01942-2.

8. Melekhov, S. I. Vliyanie pozharov na les [The impact of fires on the forest]. M.-L. Gos. lesotekhn. izd-tvo. 1948. 126 p. (in Russian).

9. Demakov Yu. P., Kalinin K. K. Lesovodstvo. Vedenie hozyajstva v lesah porazhennyh pozharami: Uchebnoe posobie [Forestry. Farming in forests affected by fires]. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2003. 135 p. (in Russian).

10. Makarov A. V. Ocenka tekhnicheskogo kachestva drevesiny sosny, povrezhdennoj pozharom: dis… kand tekhn. nauk: 05.21.05 [Technical qualities of wood affected by various types of fire]/ Makarov Andrej Vasil'evich; [Mesto zashchity: Voronezh: VGLTA, 2013. p. 16 (in Russian).

11. Hao X., Wang Q., Wang Y. et al. The effect of oil heat treatment on biological, mechanical and physical properties of bamboo. *J Wood Sci* **67,** 13 (2021). https://doi.org/10.1186/s10086-021-01942-2.

Сведения об авторах

Снегирева Светлана Николаевна – кандидат биол. наук, доцент 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/0000-0003-4371-2270, e-mail: svetka-sneg@yandex.ru.

✉ *Платонов Алексей Дмитриевич* – доктор техн. наук, заведующий кафедрой древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5941-6287, e-mail: aleksey66@yandex.ru.

Киселева Александра Владимировна – кандидат техн. наук, доцент 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/0000-0002-5960-6133, e-mail: avk50@yandex.ru.

Кантиева Екатерина Валентиновна – кандидат техн. наук, доцент кафедры механической технологии древесины, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8352-1941: ekantieva@mail.ru.

Information about the authors

Svetlana N. Snegireva – Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of the Chair of Wood Science, Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4371-2270, e-mail: svetka-sneg@yandex.ru.

✉ *Aleksei D. Platonov* – Dr. Sci. (Engineering), Head of the Chair of Wood Science, Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5941-6287, e-mail: aleksey66@yandex.ru.

Aleksandra V. Kiseleva – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Chair of Wood Science, Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5960-6133, e-mail: avk50@yandex.ru.

Ekaterina V. Kantieva – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Chair of the Department of Production, Mechanical Wood Technology, Voronezh State Forestry Engineering University named after G. F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8352-1941: ekantieva@mail.ru.

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8

УДК 169.113

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ГИДРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА ЛЕСНОГО МАНИПУЛЯТОРА

Сотир П. Глушков,[1] sotirgluschkov@abv.bg, 0000-0002-9089-417X
Александр Т. Рыбак[2], 2130373@mail.ru, 0000-0001-9950-3377
Пётр И. Попиков[3], popikovpetr@yandex.ru, 0000-0002-6348-8934
Владимир И. Усков[3], vum1@yandex.ru, 0000-0002-3542-9662
Дмитрий С. Богданов[3], ✉ bogdanov_s69@mail.ru, 0000-0003-4179-8189
Андрей В. Конюхов[3], akoniukhov@gmail.com, 0000-0002-1828-3673

[1]*Институт лесоводства Болгарской академии наук, 132 Кл. Охридски, 1756, София, Болгария*
[2]*ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*
[3]*ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация*

В настоящее время в России принят курс на создание конкурентоспособных машин и оборудования. Это относится и к мобильным лесозаготовительным машинам манипуляторного типа. Поэтому проектирование и создание лесных манипуляторов с энергосберегающим гидроприводом является актуальной задачей. Приведен анализ исследований технологических, динамических и кинематических характеристик машин манипуляторного типа. Представлена новая гидрокинематическая схема механизма подъема стрелы с системой рекуперации энергии в пуско-тормозных режимах. Разработана математическая модель процесса подъема стрелы, описываемая системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка. Вследствие нелинейности решить задачу в явном виде невозможно, поэтому применяется метод конечных разностей, в котором все производные заменяются соответствующими разностными аналогами. Тем самым, исходная система сводится к системе рекуррентных соотношений второго порядка. Для решения соотношений применяются методы теории операторов, функционального анализа. Искомые функции найдены в виде совокупности точек в узлах разбиения отрезка по времени. Предварительные расчеты с использованием программы MathCad показали, что подключение энергосберегающего демпфирующего устройства в гидропривод механизма подъема стрелы позволяет снизить пиковое давление в гидролинии поршневой полости гидроцилиндра при переходных режимах в 1,5-1,6 раза. Экспериментальные исследования, проведенные на лабораторном стендовом гидроманипуляторе, позволили получить статистические данные анализа давления системы без аккумулятора и с аккумулятором, а также величину запасаемой энергия за один цикл, которая составила около 30%. Математическая модель представленного энергосберегающего гидропривода лесного гидроманипулятора показывает принципиальную возможность реализации принципа энергосбережения при пуско-тормозных режимах погрузочно-разгрузочных работ. Снижение динамической нагруженности и энергоемкости рабочих процессов механизма подъема стрелы лесного манипулятора путем обоснования параметров энергосберегающего демпфирующего устройства гидропривода позволяет повысить надежность манипулятора, уменьшить энергозатраты, а также время простоев в ремонте из-за выхода из строя гидр оборудования. Полученные результаты могут использоваться при проектировании рекуперативных систем другого грузоподъемного оборудования в строительстве и сельском хозяйстве.

Ключевые слова: гидроманипулятор, механизм подъема, рекуперация, динамические нагрузки, энергозатраты.

Благодарности: Авторы выражают признательность заведующему кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин доценту Дручинину Денису Юрьевичу за оказанную помощь в подготовке материалов для статьи, а также главному редактору доценту Новикову Артуру Игоревичу за оказание помощи с оформлением данной статьи

Конфликт интересов: Авторы данной статьи заявили об отсутствии личных, коммерческих, идеологических, интеллектуальных конфликтов интересов при подготовке, написании и публикации данной статьи.

Для цитирования: Моделирование рабочих процессов энергосберегающего гидропривода механизма подъема лесного манипулятора / С. П. Глушков, А. Т. Рыбак, П. И. Попиков, Д. С. Богданов, А. В. Конюхов, В. И. Усков // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 88–99. – Библиогр.: с. 96–98 (13 назв.). – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8.

Поступила: 15.11.2021 ***Принята к публикации***: 22.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

MODELING OF THE WORKING ENERGY-SAVING PROCESSES OF THE HYDRAULIC DRIVE OF THE LIFTING MECHANISM OF A FORESTRY MANIPULATOR

Sotir P. Glushkov,[1] , sotirgluschkov@abv.bg, 0000-0002-9089-417**X**
Alexander T. Rybak[2], 2130373@mail.ru, 0000-0001-9950-3377
Pyotr I. Popikov[3], popikovpetr@yandex.ru, 0000-0002-6348-8934
Vladimir I. Uskov[3], vum1@yandex.ru, 0000-0002-3542-9662
Dmitry S. Bogdanov[3], ✉ bogdanov_s69@mail.ru**,** 0000-0003-4179-8189
Andrey V. Konyukhov[3], akoniukhov@gmail.com, 0000-0002-1828-3673

[1]*Forest Research Institute, Bulgarian Academy of Sciences, 132 Kl. Ohridski street,1756, Sofia, Bulgaria*
[2]*FGBOU VO "Don State Technical University" (Rostov-on-Don, Russian Federation)*
[3]*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation*

Abstract

At present Russia has adopted a course towards the creation of competitive machinery and equipment. This also applies to mobile manipulator-type forestry machines. Therefore, the design and creation of forestry manipulators with an energy-saving hydraulic drive is an urgent task. The analysis of research of technological, dynamic and kinematic characteristics of manipulator-type machines is given. A new hydrokinematic diagram of the boom lifting mechanism with an energy recuperation system in starting and braking modes is presented. A mathematical model of the boom lifting process has been developed, described by a system of nonlinear differential equations of the second order. Due to nonlinearity, it is impossible to solve the problem in an explicit form; therefore, the finite difference method is used, in which all derivatives are replaced by the corresponding difference analogs. Thus, the original system is reduced to a system of second-order recurrence relations. To solve the relations, the methods of operator theory and functional analysis are used. The sought-for functions are found in the form of a set of points at the nodes of the division of the segment in time. Preliminary calculations using the MathCad program showed that the connection of an energy-saving damping device to the hydraulic drive of the boom lifting mechanism makes it possible to reduce the peak pressure in the hydraulic line of the piston cavity of the hydraulic cylinder during transient modes by 1.5-1.6 times. Bench hydraulic manipulator, made it possible to obtain statistical data on the analysis of the pressure of the system without and with

an accumulator, as well as the amount of stored energy per cycle, which amounted to about 30%. The mathematical model of the presented energy-saving hydraulic drive of the forest hydraulic manipulator shows the fundamental possibility of implementing the principle of energy saving during starting and braking modes of loading and unloading operations. Reducing the dynamic loading and energy intensity of the working processes of the boom lifting mechanism of the forestry manipulator by justifying the parameters of the energy-saving damping device of the hydraulic drive allows increasing the reliability of the manipulator, reducing energy costs, as well as the downtime for repairs due to the failure of hydraulic equipment. The results obtained can be used in the design of recuperative systems for other lifting equipment in construction and agriculture.

Keywords: hydraulic manipulator, lifting mechanism, recuperation, dynamic loads, energy costs.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the head of the department of mechanical forestry and machine design Denis Yuryevich Druchinin for his help in preparing materials for articles, as well as to the chief editor Novikov Artur Igorevich for helping with the design of this article.

Conflict of interest: The authors of this article stated that there were no personal, commercial, ideological, intellectual conflicts of interests in the preparation, writing and publication of this article.

For citation: Glushkov S. P., Rybak A. T., Popikov P. I., Uskov V. I., Bogdanov D. S., Konyukhov A. V. Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator. Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry engineering journal]. 2021. Vol. 11. № 4 (44). – P. 88–99. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8.

Received: 15.11.2021 ***Revised:*** 13.12.2021 ***Accepted***: 22.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Introduction

At present, Russia has adopted a course towards the creation of competitive machinery and equipment. This also applies to mobile timber harvesting machines of the manipulator type; at the present moment, loading and transport vehicles with manipulators are widely used in thinning forest management. In the Russian Federation, hydraulic manipulators of the brands LV-184A-10, LV-185-14A, LV-190-05, MM-100 are often used, which are installed as part of a road train behind the cab of a car or on the rear overhang of a subframe Hydraulic manipulator LV-184A-10 is the lightest in the class of carrying capacity (52 kN) and is well adapted to our conditions. The manipulator MAYMAN-100S (MM-100) is equipped with a higher quality and efficient hydraulic pump SUNFAB SC-064 (084) with increased productivity and Swedish or Italian hydraulic distributors. It is possible to complete it with a two-loop control system, which allows to reduce dynamic loads and to save fuel consumption by up to 7%. Basic models of Epsilon manipulators: C70L, M100L and Q150L are equipped with strong metal structures, cast column bases.

The experience of operating forest hydraulic manipulators in the regions of the Komi Republic showed that due to high dynamic loads at low air temperatures, failures of high-pressure hoses are 29.7–56%, and hydraulic cylinders 14.0–24.1% [1]. With the wear of the seals, the initial amplitude of the pressure fluctuations of the working fluid decreases, and the period of the oscillations increases. The logarithmic damping decrement decreases to the limit value δ = 0,533 which requires repair of the hydraulic cylinder. Using the developed mathematical model of dynamic processes inside the hydraulic cylinder, a new method for diagnosing hydraulic cylinders has been substantiated.

In work [2], technological operations of a forwarder manipulator were investigated: loaded movements; empty movements and movements of the manipulator when performing operations inside the cargo compartment. It was found that the technological cycle of the manipulator includes 63% of the time of the

busy movement, 30% of the time is spent on idle transfers and 7% for the operations performed inside the cargo compartment. As a result of the obtained experimental data, linear regressions of the loading time (sec / m3) were constructed depending on the loading volume and the number of loaded assortments (on average, 47 pieces). The movement time of the manipulator links was recorded by a stopwatch from the start of movement in the cargo space until the jaws of the grabber touched the logs lying on the ground, and until the opening of the jaws, when the assortments were unloaded inside the cargo area of the forwarder. Cases of empty manipulator movements to delete branches were taken into account. sorting and moving of individual log truck.

In addition to studying the influence of various factors on individual elements of the technological cycle, there are a number of works in foreign journals, in which the authors published the results of research on various aspects of automation of manipulators. In the works [3,4,7,8], the concept of an electro hydrostatic drive, applicable to hydraulic manipulators of large carrying capacity, is presented. The drive is designed and analyzed for requirements such as load holding, overload handling and differential flow compensation. Numerical analysis is carried out with the system connected to a constant load mass. Load weight 30,000 kg, accumulator precharge gauge pressure 5 bar. The cylinder moves the mass vertically. It is accepted that the force acting on the cylinder consists of three parts: hydraulic force, gravity force and friction force. The friction force is modeled by the viscous friction coefficient and the Coulomb friction force. Comparison with traditional valve operated actuators showing efficiency gains and energy recovery capabilities.

The work [5, 6] is devoted to the study of a promising scheme of a recuperative hydraulic drive of a timber truck-manipulator. On the basis of mathematical and simulation modeling of the operation of the pneumatic recuperation system, the dependences of the influence of time on the amount of compressed air, pressure and temperature in the pneumatic accumulator were obtained. The pressure after three strokes of one and the other pneumatic cylinders is 2.3 MPa. With continuous consumption of compressed air, pressure pulsations do not exceed 0.4 MPa. It has been established that with intensive periodic compression of air in pneumatic cylinders, high temperatures arise above 1000 K, and the average air temperature is about 200-300 °C. High air temperatures in pneumatic cylinders for energy recovery are a disadvantage of the proposed pneumatic systems.

Investigations of the kinematic and dynamic characteristics of hydraulic manipulators with the combination of the movements of the boom and stick are devoted to works [9, 10]. The graphs of the changes in the pressure values of the working fluid in the hydraulic system with the course of time were obtained. When the movement of the two links is combined, increased fluctuations in the working pressure are observed, and when the movement of the arm stops, the pressure is set at a nominal pressure of 12.5 MPa. The graphs of angular velocities were obtained, which at the beginning of the movement have a smooth character; the boom is overloaded.

However, in our opinion, studies of the dynamic and kinematic characteristics of energy-saving devices as applied to the lifting mechanisms of forest manipulators have not been carried out enough, therefore, additional research in this direction is urgent.

Purpose of the study is to reduce the dynamic loading and energy intensity of the working processes of the boom lifting mechanism of a forest manipulator by substantiating the parameters of an energy-saving hydraulic drive based on solving a mathematical model.

Materials and methods

A serial hydraulic manipulator LV-184 A -10, which is mounted on the chassis of short log trucks, was chosen as the object of research. We propose a new energy-saving hydraulic drive for the boom lifting mechanism of a forestry manipulator [11], which includes an additional recuperation hydraulic cylinder and a hydropneumatic accumulator, which accumulates braking energy when lowering the load and returns it during subsequent lifting of the load (Fig. 1).

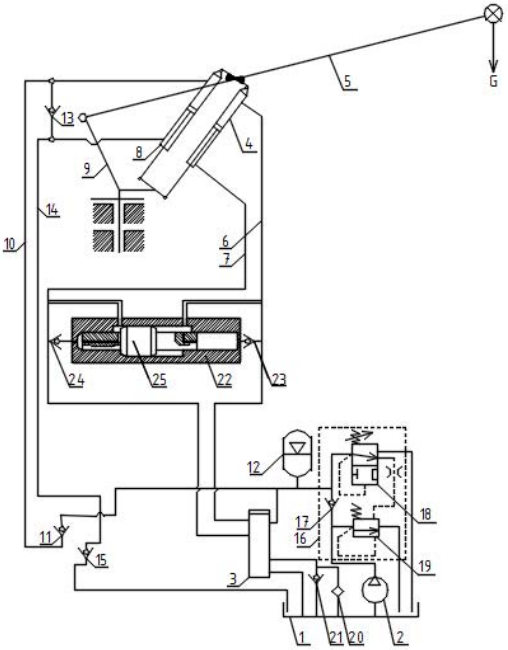


Рисунок 1. Энергосберегающий гидропривод механизма подъема стрелы лесного манипулятора 1-бак; 2- насос; 5; 6; 7; 10; 14- гидролинии; 4-гидроцилиндр привода стрелы 5; 8-дополнительный гидроцилиндр рекуперации; 11; 13; 15; 17; 21; 23- обратные клапаны 12-гидроаккумулятор; 19-предохранительный клапан; 18-разгрузочное устройство; 22-демпфер; 25-плунжер

Figure 1. Energy-saving hydraulic boom lift for forestry manipulator hydraulic tank 1; pump 2; hydrolines 5; 6; 7; ten; fourteen; hydraulic cylinder 4 of the boom drive 5; additional hydraulic cylinder for recuperation 8; check valves 11; 13; 15; 17; 21; 23; hydroaccumulator 12; safety valve 19; unloading device 18; damper 22; plunger 25

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

To study the process of loading operations, taking into account the connection of a hydropneumatic device to the hydraulic drive of the boom lifting mechanism, we considered the calculated case of lifting a bundle of assortments load with a maximum reach of the manipulator on a slope, for example, when the soil subsides under the right outrigger at point A. To substantiate the parameters of the energy-saving hydraulic drive of the boom lifting mechanism a computational scheme was drawn up, which is shown in Fig. 2

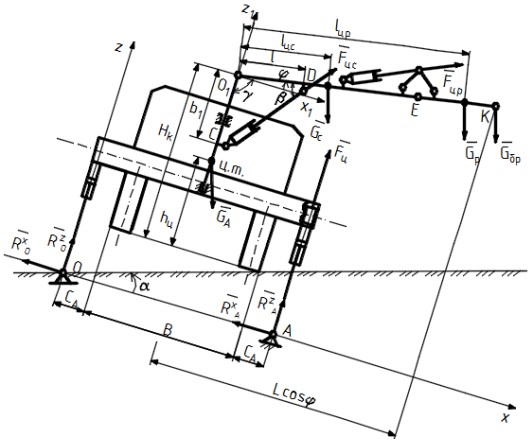


Рисунок 2. Расчетная схема манипулятора на склоне (действующие силы: $G_{бр}$ - сила тяжести бревен в захвате, Н; G_c - сила тяжести стрелы, Н; $G_р$ - сила тяжести рукояти, Н; $F_{цс}$ - усилие в гидроцилиндре для подъема стрелы, Н)

Figure 2. Calculation diagram of an auto-log truck manipulator on a slope (acting forces: Gbr is the gravity of the logs in the grip, N; Gs is the gravity of the boom, N; Gs is the gravity of the handle, N; Fcs is the force in the hydraulic cylinder for lifting the boom, N)

Источник: собственная композиция автор(ов)

Source: author's composition

We have developed a mathematical model for lifting the boom of a manipulator with an energy-saving hydraulic drive when working on a slope, when the accumulator is fully charged and gives up the accumulated energy when lowering the load to raise the boom:

$$\begin{cases} \left(J_{бр}+J_p+J_c\right)\dfrac{d^2\varphi}{dt^2}=\dfrac{\pi d_c^2 l\ \sin\beta}{4}\cdot p- \\ -\left(G_{бр}L+G_p l_{ц.р}+G_c l_{ц.с}\right)\cos(\varphi-\alpha), \\ q_н n_н=\dfrac{\pi d_c^2 l\ \sin\beta}{4}\cdot\dfrac{d\varphi}{dt}-k_{ак}\sqrt{P_A-p}\ + \\ +a_y p-\dfrac{V_{сум}}{E_{пр}}\cdot\dfrac{dp}{dt}, \\ \dfrac{dP_A}{dt}=\dfrac{-E_{ж}\,k_{ак}}{V_0\left[1-\left(\frac{P_o}{P_A}\right)^{\frac{1}{K}}+\frac{E_Ж}{KP_A}\left(\frac{P_0}{P_A}\right)^{\frac{1}{K}}\right]}\cdot\sqrt{P_A-p}\ , \end{cases} \quad (1)$$

where $J_{бр}$, $J_р$, $J_с$ – moments of inertia of a bundle of logs, a stick, an arrow relative to a point O_1, kg·m^2;

φ – boom angle, radians;

α – slope angle, radians;

t – time, s;

$G_{бр}$ – gravity of the bundle of logs in the gripper, H;

$d_с$ – inner diameter of the hydraulic cylinder, m;

$q_н$ – pump displacement, м^3/ turnover;

$n_н$ – pump speed, s^{-1};

p – current pressure in the discharge line, Pa;

P_A – current value of pressure in the accumulator , Pa;

Po – accumulator pre-charge pressure, Pa;

Vo – working volume of the accumulator, m^3;

$E_{пр}$ – reduced modulus of elasticity of the working fluid and elastic elements of the hydraulic drive, Pa;

$E_{ж}$ – modulus of elasticity of the liquid, Pa

K – gas adiabatic index in the accumulator equal to 1,41;

μ – the flow coefficient is 0,7...0,8;

$d_{ак}$ – inner diameter of the hydraulic accumulator nozzle, m

$d_р$ – internal diameter of the energy recovery hydraulic cylinder, m;

g – acceleration of gravity, m/s^2;

ρ – working fluid density, kg/m^3;

V_{sum} – total volume of the supply pipeline, m^3;

$k_{ак}$ – battery choke throttling ratio, m^3·c·Pa$^{-1/2}$

$$k_{ак} = \frac{\mu\pi d_{ак}^2}{4}\sqrt{\frac{2}{\rho}}. \qquad (2)$$

The designations of the remaining geometric parameters of the boom lifting mechanism included in equations (1) are clear from Fig. 2. Note that in the triangle O1DC, the cosine theorem implies the relation between the angles β, γ, φ

$$\sin\beta = \frac{b_1 \sin(\gamma+\varphi)}{\sqrt{l^2+b^2-2lb_1\cos(\gamma+\varphi)}}. \qquad (3)$$

In this work, for the possibility of solving the problem, it is assumed that the angle β does not depend on t on a separate site, this means that the ratio on the right side of the formula is constant for each t.

On the segment $t \in [0; t_k]$ we consider the Cauchy problem:

$$\begin{cases} \varphi(0) = \varphi_0, \quad p(0) = p_0\,, \quad P_A(0) = P_{A_0}, \\ \varphi'(0) = \varphi_1, \quad p'(0) = p_1\,, \quad P_A'(0) = P_{A_1}. \end{cases} \qquad (4)$$

Research results. A mathematical model of the boom lifting process is presented, described by a system of second-order nonlinear differential equations. The highest derivative has an irreversible operator - such systems are unresolved with respect to this derivative. Due to the nonlinearity of the system, it is impossible to find a solution in the explicit form of the dependence on t, which entails the need to use approximate methods. The sought functions are calculated at the nodal points t_i. We denote

$$\varphi_i = \varphi(t_i), \;\; p_i = p(t_i), \;\; P_{A_i} = P_A(t_i)\,, \qquad (5)$$

where number i varies from 0 to n inclusive. One of the approximate methods is the finite difference method, in which all derivatives are replaced by the corresponding difference analogs:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi}{dt}(t_i) \approx \frac{\varphi_{i+1}-\varphi_i}{h}, \frac{d^2\varphi}{dt^2}(t_i) \approx \frac{\varphi_{i+2}-2\varphi_{i+1}+\varphi_i}{h^2}; \\ \frac{dp}{dt}(t_i) \approx \frac{p_{i+1}-p_i}{h}, \frac{d^2p}{dt^2}(t_i) \approx \frac{p_{i+2}-2p_{i+1}+p_i}{h^2}; \\ \frac{dP_A}{dt}(t_i) \approx \frac{P_{Ai+1}-P_{Ai}}{h}, \frac{d^2P_A}{dt^2}(t_i) \approx \frac{P_{Ai+2}-2P_{Ai+1}+P_{Ai}}{h^2}. \end{cases} \qquad (6)$$

which leads to a system of second-order recurrence relations.

Since system (1) is not resolved with respect to the derivative, the Cauchy problem has a solution not for all initial values.

To solve it with respect to the highest derivative, the result obtained in [12, Theorem 2.1] is used, due to which the system splits into equalities in subspaces of decreasing dimensions. This solution is called the cascade decomposition method. This method was successfully applied, for example, in the study of perturbations of a linear algebraic-differential equation caused by the presence of a small parameter in [13]. For systems of recurrence relations, such an approach is applied, in our opinion, for the first time.

We have carried out the necessary calculations.

Theorem. A solution to problem (1), (3) exists if and only if the following equalities hold:

$$p_1 - p_0 = \sigma(\varphi_1 - \varphi_0) + $$
$$+h \cdot \frac{E_{пр}}{V_{сум}} \cdot \left(-k_{ак}\sqrt{P_A - p} + a_y\, p_0 - q_н\, n_н\right),$$
$$P_{A_1} - P_{A_0} = \frac{-h\, E_ж\, k_{ак}\sqrt{P_{A_0} - p_0}}{V_0\left[1 - \left(\frac{P_o}{P_{A_0}}\right)^{\frac{1}{K}} + \frac{E_Ж}{KP_{A_0}}\left(\frac{P_0}{P_{A_0}}\right)^{\frac{1}{K}}\right]}. \quad (7)$$

The following algorithm has been developed for solving problem (1), (3) on a computer.

1. Enter the values of the coefficients$J_{бр}$, $J_р$, $J_с$, d_c^2, l, $G_{бр}$, L, $G_р$, $l_{ц.р}$, $G_с$, $l_{ц.с}$, α, $q_н$, $n_н$, μ, a_y, $V_{сум}$, $E_{пр}$, $E_ж$, V_0, P_o, K, ρ. Определить $k_{ак}$ формулой (2) и σ - формулой

$$\sigma = \frac{\pi\, d_c^2\, l\, E_{пр} \sin\beta i}{4V_{сум}}. (8)$$

2. Enter initial values (at time t=0) the required quantities: φ_0, p_0, P_{A_0}.

It follows from the theorem above that the values of the rates of change φ_1, p_1, P_{A_1} of the required quantities at the initial moment of time must be entered so that equalities (7) are satisfied.

3. Enter value t_k the right end of the segment of change of the variable t. Split this segment with equally spaced anchor points t_i with step h:

$$t_i = i \cdot h, \quad (9)$$
$$where \quad h = \frac{t_k}{n}, \quad n - number\ of\ split\ points$$

Comment. The larger n, the smaller the error in approximating real functions by their values at the nodal points.

4. Enter the following values

$$\Phi_i^{(1)} = \frac{\pi\, d_c^2\, h^2\, l \sin\beta}{4\left(J_{бр} + J_р + J_с\right)}\, p_i - $$
$$- \frac{\left(G_{бр}L + G_р l_{ц.р} + G_с l_{ц.с}\right) h^2}{J_{бр} + J_р + J_с} cos(\varphi_i - \alpha), (10)$$

$$\Phi_i^{(2)} = \frac{\pi^2\, d_c^4\, h^2\, l^2 E_{пр}\ sin^2\beta}{16\, V_{сум}\left(J_{бр} + J_р + J_с\right)}\, p_i - $$
$$- \frac{\pi\, d_c^2\, h^2\, E_{пр}\, l\ \sin\beta\ \left(G_{бр}L + G_р l_{ц.р} + G_с l_{ц.с}\right)}{J_{бр} + J_р + J_с} \cos(\varphi_i - \alpha) - $$
$$- \frac{E_{пр}\, h\, k_{ак}\, \mu}{V_{сум}} \sqrt{P_{A_{i+1}} - p_{i+1}} + $$
$$+ \frac{a_y\, E_{пр}\, h}{V_{сум}}\, p_{i+1} - \frac{E_{пр}\, h\, n_н\, q_н}{V_{сум}}, (11)$$

$$\Phi_i^{(3)} = -\frac{-h\, k_{ак} E_ж\, K\, P_{A_{i+1}} \sqrt{P_{A_{i+1}} - p_{i+1}}}{K\, P_{A_{i+1}} \left(\frac{P_0}{P_{A_{i+1}}}\right)^{\frac{1}{K}} V_0 - E_ж\, V_0 \left(\frac{P_0}{P_{A_{i+1}}}\right)^{\frac{1}{K}} - K\, V_0\, P_{A_{i+1}}}. (12)$$

5. The sought values for each i=2,3...,n are determined from iterative processes, when each value is obtained by calculating the previous ones.

The angle φ (in radians) is determined by the formula

$$\varphi_i = \varphi_0 + i(\varphi_1 - \varphi_0) + $$
$$+ \sum_{k=1}^{i} \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k\, C_{k-1}^j\, (-1)^{k-1-j}\, (i - 1 - j)\ \Phi_j^{(1)}; (13)$$

pressure p - by the formula

$$p_i = p_1 + i\, \sigma\, (\varphi_1 - \varphi_0) + $$
$$+ \sigma \sum_{k=1}^{i} \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k\, C_{k-1}^j\, (-1)^{k-1-j}\, (i - 2 - j)\ \Phi_j^{(1)} + $$
$$+ \sum_{k=1}^{i} \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k\, C_{k-1}^j\, (-1)^{k-1-j}\ \Phi_j^{(2)} + \sigma\, \Phi_{i-1}^{(1)} $$
$$- \Phi_{i-1}^{(2)}; (14)$$

P_A pressure - by the formula

$$P_{A_i} = P_{A_1} + \sum_{k=1}^{i} \sum_{j=0}^{k-1} C_i^k\, C_{k-1}^j\, (-1)^{k-1-j}\ \Phi_j^{(3)} $$
$$- \Phi_{i-1}^{(3)}, \quad (15)$$

where indicated

$$C_n^m = \frac{n!}{m!\,(n - m)!}. \quad (16)$$

6. Knowing the values φ_i, p_i, p_{A_i}, calculated in the previous step, one can calculate their first and second derivatives using approximate formulas (4).

7. Knowing the angle φ_i, you can calculate the value of the angle β from the formula (3) and build a graph of dependence $Sin(\beta)$ from the angle of rotation of the boom φ_i (рис. 3whose data is used in the calculations.

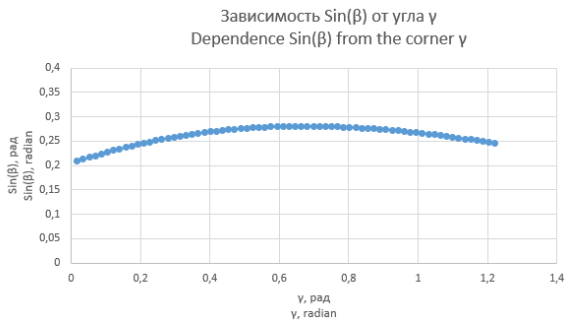


Рисунок 3 Зависимость $Sin(\beta)$ от угла поворота стрелы φ_i

Figure 3 Dependence of $Sin(\beta)$ on the angle of rotation of the boom φ_i

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

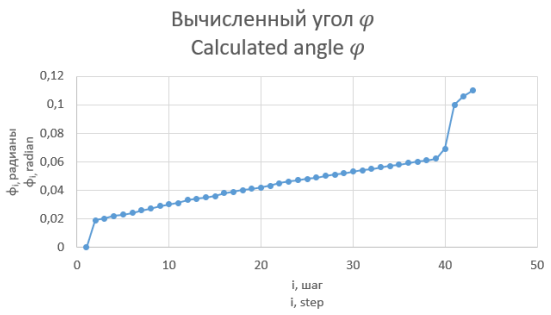


Рисунок 4. Рассчитанное значение φ_i в радианах

Figure 4. Calculated value angle φ_i in radian

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Preliminary calculations using the MathCad program made it possible to obtain the kinematic and dynamic parameters of the energy-saving hydraulic drive of the boom lifting mechanism. Figure 4 shows the dependence of the angle of rotation of the boom on time, the angle of rotation increases smoothly at first, and then sharply increases, which is explained by the kinematic properties of the four-link mechanism The graphs of the working fluid pressure dependencies (Fig. 5) showed that the connection of an energy-saving damping device to the hydraulic drive of the boom lifting mechanism allows to reduce the peak pressure in the hydraulic line of the piston cavity of the hydraulic cylinder during transient modes by 1.5-1.6 times.

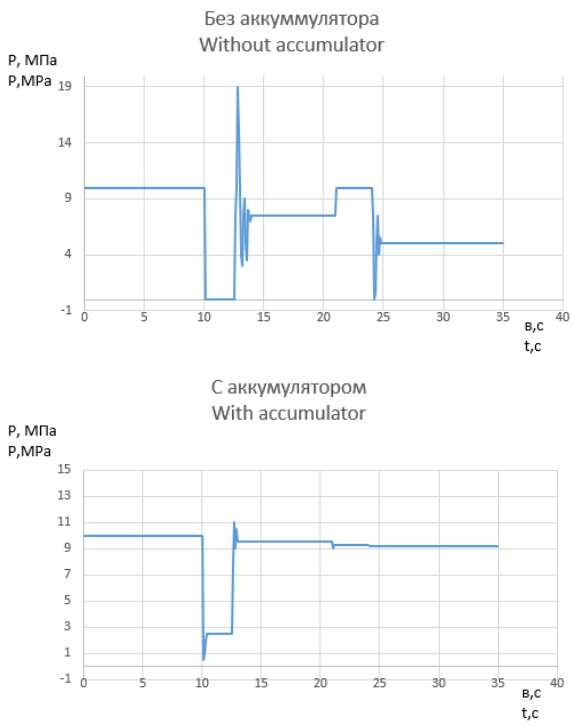


Рисунок 5. Теоретические зависимости давления в гидросистеме при использовании энергосберегающего демпфирующего устройства

Figure 5. Theoretical dependences of pressure in the hydraulic system when using an energy-saving damping device

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Based on the statistical analysis of the experimental maximum mean values of the working fluid pressure obtained on the laboratory bench, the following coefficients were calculated (Tables 1 and 2).

All of the listed coefficients are close to 1, which indicates a fairly close relationship between the two datasets. It was also found empirically that the energy-saving hydraulic drive of the boom lifting mechanism of the manipulator stores about 30% energy when lowering the boom with a load and returns it back when the load is subsequently lifted.

Таблица 1

Статистические данные анализа давления системы без аккумулятора и с аккумулятором

Table 1

System pressure analysis statistics without accumulator and with accumulator

	Без аккумулятора | Without accumulator	*С аккумулятором | With accumulator*
Название | Name	Значение | Value	
Среднее | Average	17,933	10,460
Стандартная ошибка | Standard error	0,3092	0,3199
Медиана | Median	17,5	10,235
Стандартное отклонение | Standard deviation	1,0255	1,061
Дисперсия выборки | Sample variance	1,0518	1,1259
Эксцесс | Excess	0,09976	-0,3240
Асимметричность | Asymmetry	0,96401	0,5128

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Таблица 2

Коэффициенты, полученные в ходе дисперсионного и корреляционного анализа

Table 2

Coefficients obtained in the course of analysis of variance and correlation

Название| *Name*	Значение | Value
Коэффициент регрессии | Regretion coefficient	0,974
R-квадрат | R-square	0,948
Коэффициент Спирмена | Spearman coefficient	0,9736
Коэффициент Пирсона | Pearson coefficient	0,974

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

The use of a new energy-saving hydraulic drive for the boom lifting mechanism of a forestry manipulator allows to significantly smooth out pressure surges in the hydraulic system, in addition, in transient modes, high-frequency pressure fluctuations are eliminated, which cause fatigue destruction of metal structures of the manipulator elements. The pressure surges of the working fluid do not exceed the setting pressure of the safety valves, which do not convert the hydraulic energy of the fluid flow into thermal energy, and the hydraulic system of the manipulator does not overheat.

Thus, reducing the dynamic loading and energy intensity of the working processes of the boom lifting mechanism of the forestry manipulator by justifying the parameters of the energy-saving damping device of the hydraulic drive makes it possible to increase the reliability of the manipulator, reduce energy costs, as well as the downtime for repairs due to the failure of hydraulic equipment.

Conclusion

1. Analysis of research on technological, dynamic, and kinematic characteristics of manipulator-type machines showed that, due to high dynamic loads, failures of high-pressure hoses are 29.7–56%, and hydraulic cylinders 14.0–24.1%.

2. To reduce the dynamic loading and energy intensity of the working processes of timber carriers during loading and unloading operations, a new energy-saving hydraulic drive of the mechanism for lifting the boom of a forest manipulator is proposed.

3. A mathematical model of the process of lifting a bundle of timber when loading by a manipulator onto a timber carrier has been developed and implemented, it has been established that the energy-saving hydraulic drive of the boom lifting mechanism reduces the peak pressure by 1.5-1.6 times, stores about 30% of energy when lowering the boom with a load and returns it back when the load is subsequently lifted.

Список литературы

1. Тарбеев А.А. Обеспечение надежности гидроприводов лесных машин совершенствованием методов и средств их диагностирования : автореф. дис. канд. техн. наук / А.А. Тарбеев. Йошкар-Ола, 2019 17 с.

2. Piskunov M. Investigation of Structure of Technology Cycle Time of Hydraulic Manipulators in the Process of Loading Forwarders with Logs. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. 2021. T. 42. №. 3. C. 391-403. https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.863

3. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators. Energies. 2021. T. 14. №. 20. C. 6566. https://doi.org/10.3390/en14206566

4. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load. Mechatronics. 2021. T. 77. C. 102599. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102599

5. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. Investigation of the energy-saving hydraulic drive of a multifunctional automobile with a subsystem of accumulation of compressed air energy. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. T. 441. №. 1. C. 012041.doi: 10.1088 / 1757-899x / 441/1/012041.

6. Katrakilidis K. et al. Investigation of the pneumatic system of recuperative hydraulic drive of a timber truck. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. T. 595. №. 1. C. 012062. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/595/1/012062.

7. Qu S. et al. A high-efficient solution for electro-hydraulic actuators with energy regeneration capability. Energy. 2021. T. 216. – C. 119291. Http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.119291

8. Agostini T. et al. Effect of energy recovery on efficiency in electro-hydrostatic closed system for differential actuator Actuators. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. T. 9. №. 1. C. 12. doi.org/10.3390/act9010012

9. Лагерев И. А. Расчетно-экспериментальное исследование динамики манипуляционной системы при совместном движении звеньев. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 11-2. С. 62-71. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rezhimov-raboty-gidroprivodov-s-chastotno-drosselnym-regulirovaniem-mobilnyh-transportno-peregruzochnyh-kanatnyh.

10. Лагерев А. В., Лагерев И. А. Моделирование рабочих процессов в дроссельно-регулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при раздельном движении звеньев. Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. № 4. С. 355-379. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rabochih-protsessov-v-drosselno-reguliruemom-gidroprivode-manipulyatsionnyh-sistem-mobilnyh-mashin-pri-razdelnom.

11. Пат. № 2 652 596 РФ, МПК b66c13 / 42, гидравлический привод подъемного механизма стрелы манипулятора / П. Попиков, В. Зеликов, К. Меняйлов, И. Четверикова, Д.Н. Родионов; заявитель и патентообладатель воронежского государственного лесного университета имени М.Ф. Морозова »; заявка 09.01.2017; опубл. 27.04.2018.

12. Усков В. И. Начально-краевая задача для возмущенных дифференциальных уравнений с частными производными третьего порядка // journal of mathematical sciences (new york). 2021, т. 255, нет. 6. С. 779-789. - doi: 10.1007 / s10958-021-05415-1. - https://link.springer.com/article/10.1007/s10958-021-05415-1

13. Зубова С. П., Усков В. И. Асимптотическое решение задачи коши для уравнения первого порядка с малым параметром в банаховом пространстве. Регулярный случай. Математические заметки. 2018. 103, нет. 3. С. 395-404. https://doi.org/10.1134/s0001434618030069.

References

1. Tarbeiv A.A. Ensuring the reliability of hydraulic drives of forest machines by improving the methods and means of their diagnostics: author. Cand. Tech. Science / A.A. Tarbeiv – Yoshkar-Ola, 2019 – 17 p

2. Piskunov M. Investigation of Structure of Technology Cycle Time of Hydraulic Manipulators in the Process of Loading Forwarders with Logs. Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. 2021. T. 42. №. 3. C. 391-403. https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.863

3. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators. Energies. 2021. T. 14. №. 20. C. 6566. https://doi.org/10.3390/en14206566

4. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load. Mechatronics. 2021. T. 77. C. 102599. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102599

5. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. Investigation of the energy-saving hydraulic drive of a multifunctional automobile with a subsystem of accumulation of compressed air energy. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2018. T. 441. №. 1. C. 012041.doi: 10.1088 / 1757-899x / 441/1/012041.

6. Katrakilidis K. et al. Investigation of the pneumatic system of recuperative hydraulic drive of a timber truck. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. T. 595. №. 1. C. 012062. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/595/1/012062.

7. Qu S. et al. A high-efficient solution for electro-hydraulic actuators with energy regeneration capability. Energy. 2021. T. 216. – C. 119291. Http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.119291

8. Agostini T. et al. Effect of energy recovery on efficiency in electro-hydrostatic closed system for differential actuator Actuators. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. T. 9. №. 1. C. 12. doi.org/10.3390/act9010012

9. Lagerev I.A. Computational and experimental study of the dynamics of the manipulation system with the joint movement of the links. Izvestia of the Tula State University. Technical science. 2016. №11-2, pp. 62-71. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rezhimov-raboty-gidroprivodov-s-chastotno-drosselnym-regulirovaniem-mobilnyh-transportno-peregruzochnyh-kanatnyh

10. Lagerev I. V., Lagarev I. A. Modeling of working processes in a throttle-controlled hydraulic drive of manipulation systems of mobile machines with separate movement of links. Scientific and technical bulletin of the Bryansk state university. 2018. № 4, pp. 355-379. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rabochih-protsessov-v-drosselno-reguliruemom-gidroprivode-manipulyatsionnyh-sistem-mobilnyh-mashin-pri-razdelnom

11. Pat. № 2 652 596 рф, мпк b66c13 / 42, hydraulic drive of the lifting mechanism of the boom of the manipulator / P. Popikov, V. Zelikov, K. Menyalev, I. Chetverikova, D.N. Rodionov; applicant and patentee of the Voronezh State Forestry University named after M.F. Morozova »; application 09.01.2017; published. 27.04.2018.

12. Uskov V. I. Initial–Boundary Value Problem for Perturbed Third Order Partial Differential Equations. Journal of Mathematical Sciences. 2021. Vol. 255. №. 6. P. 779-789. https://link.springer.com/article/10.1007/s10958-021-05415-1.

13. Zubova S. P., Uskov V. I. Asymptotic Solution of the Cauchy Problem for a First-Order Equation with a Small Parameter in a Banach Space. The Regular Case. Mathematical Notes. 2018. Vol. 103. https://doi.org/10.1134/s0001434618030069.

Сведения об авторах

Глушков Сотир Петров – доктор технических наук, профессор, Институт лесоводства Болгарской академии наук, 132 Кл. Ohridski street, 1756, София, Болгария, http://orcid.org/ 0000-0002-9089-417**X,** e-mail: sotirgluschkov@abv.bg.

Рыбак Александр Тимофеевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», кафедра приборостроения и биомедицинской инженерии, машин, 344003, ЮФО, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9950-3377, e-mail: 2130373@mail.ru.

Попиков Пётр Иванович – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин машин 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6348-8934, e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Усков Владимир Игоревич – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государст-

венный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», кафедра высшей математики, 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3542-9662, e-mail: vum1@yandex.ru.

✉ *Богданов Дмитрий Сергеевич* – аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8; ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4179-8189, e-mail: bogdanov_s69@mail.ru.

Конюхов Андрей Валерьевич – аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им Г.Ф. Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1828-3673, e-mail: akoniukhov@gmail.com.

Information about the authors

Glushkov Sotir – Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Forestry, Bulgarian Academy of Sciences, 132 Cl. Ohridski street, 1756, Sofia, Bulgaria, http://orcid.org/ 0000-0002-9089-41X, e-mail: sotirgluschkov@abv.bg

Alexander T. Rybak – Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Don State Technical University", Department of Instrumentation and Biomedical Engineering, Machines, ORCID: http://orcid.org/0000- 0001-9950-3377, e-mail: 2130373@mail.ru

Pyotr I. Popikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov ", Department of Forestry Mechanization and Machine Design, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6348-8934, e-mail: popikovpetr@yandex.ru

Vladimir I. Uskov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov ", Department of Higher Mathematics, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3542-9662, e-mail: vum1@yandex.ru

✉ *Dmitry S. Bogdanov* – postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov ", Department of Forestry Mechanization and Machine Design, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4179-8189, e-mail: bogdanov_s69@mail.ru

Andrey V. Konyukhov – postgraduate student, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov ", Department of Forestry Mechanization and Machine Design, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1828-3673, e-mail: akoniukhov@gmail.com

✉ – Для контактов / Corresponding author

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/9

УДК 630*232.312.3

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДПОЛЕТНОЙ ОРИЕНТАЦИИ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПРИ МОНИТОРИНГЕ МОЛОДЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Дмитрий Н. Демидов[1]✉, dnd.vgltu@mail.ru, 0000-0002-1395-3631

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

Изучение пространственно-временных характеристик автоматизированного технического средства для аэромониторинга (АТСАЭМ) на базе беспилотного летательного аппарата четырехроторной аэродинамической схемы необходимо для повышения точности дистанционной оценки биометрических параметров молодых деревьев на экспериментальном участке. Экспериментальный участок имеет прямоугольную форму с фиксированными по углам планово-высотными реперными точками и образован пересаженными в линейные борозды глубиной 0.2-0.4 м контейнерными сеянцами сосны обыкновенной (*1+0, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation, Pinus sylvestris* L.). Разработана методика оценки геометрических и семантических параметров единичных растительных объектов молодых лесных насаждений сосны обыкновенной. С помощью аппарата дескриптивной статистики оценены начальная выставка средств управления (среднеквадратическая ошибка оценивания прецессии, нутации и собственного вращения 0.003584 рад), широта (51,82765 ± 0,00005°), долгота (39,36442 ± 0,00035°) и высота НУМ (122,951 ± 0,155 м) полета автоматизированного технического средства для аэромониторинга.

Ключевые слова: автоматизированное техническое средство для аэромониторинга, предполетная ориентация, молодые лесные насаждения, средства управления АТСАЭМ, лесовосстановление, методика оценки высоты единичного дерева.

Благодарности: Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы ВГЛТУ (регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 121092000080-7). Автор благодарит работников учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ за ценные замечания и организационно-методическую помощь в проведении исследований. Автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Демидов Д. Н. Исследование алгоритма оценки параметров предполетной ориентации средств управления беспилотного летательного аппарата при мониторинге молодых лесных насаждений / Д. Н. Демидов // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 100–111. – *Библиогр.: с. 108–111 (25 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/9.

Поступила: 01.12.2021 ***Принята к публикации***: 28.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

INVESTIGATION OF THE ALGORITHM FOR ESTIMATING THE PARAMETERS OF THE PREFLIGHT ORIENTATION OF THE CONTROLS OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE WHEN MONITORING YOUNG FOREST STANDS

Dmitriy N. Demidov [1]✉, dnd.vgltu@mail.ru, 0000-0002-1395-3631

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

Abstract

The study of the spatio-temporal characteristics of an automated technical means for aero-monitoring (ATSAEM) based on an unmanned aerial vehicle is necessary to improve the accuracy of remote assessment of biometric parameters of young trees at the experimental site. The experimental site has a rectangular shape with plan-height reference points fixed at the corners and is formed by container seeds of Scots pine outplanted into linear furrows 0.2-0.3 m deep (*1+0, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation, Pinus sylvestris* L.). A methodology for assessing the geometric and semantic parameters of single plant objects of young forest stands of Scots pine has been developed. With the help of descriptive statistics, the initial exhibition of controls (mean square error of precession, nutation and proper rotation estimation 0.003584 rad), latitude (51.82765 ± 0.00005°), longitude (39.36442 ± 0.00035°) and altitude NUM (122.951 ± 0.155 m) of the flight of an automated technical means for aero-monitoring were estimated.

Keywords: *automated technical means for aero-monitoring (ATSAEM), preflight orientation, young forest stands, ATSAEM management tools, reforestation, methods for estimating the single tree height.*

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the VSUFT Research Work Agreement (EGISU R&D registration number 121092000080-7). The author thanks the employees of the VSUFT educational and experimental forestry enterprise for valuable comments and organizational and methodological assistance in conducting research. The author(s) thank(s) the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

***For citation*:** Demidov, D.N. (2021) Investigation of the algorithm for estimating the parameters of the preflight orientation of the controls of an unmanned aerial vehicle when monitoring young forest stands. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 100-111 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/9.

Received: 01.12.2021 ***Revised:*** 18.12.2021 ***Accepted for publication***: 28.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

Технологический процесс дистанционной оценки [1] биометрических параметров деревьев [2] на ювенильной стадии онтогенеза [3] – АЭромониторинг Молодых Лесных Насаждений (АЭМЛН), – осуществляемый на восстанавливаемой лесной площади [4], входит в «*группу операций мониторинга: ...контроля биометрических параметров лесных культур, реализованных на базе беспилотного летательного аппарата вертолетного, самолетного или гибридного типов* [5]».

Одним из экономически эффективных способов сбора разнообразных экологических данных о протяженных линейных растительных структурах является дистанционное зондирование [6]. Данные дистанционного зондирования предлагают гибкие и эффективные возможности для автоматизированного извлечения, анализа и моделирования полученных результатов. В качестве перспективных методов в

мировой науке рассматривается использование изображений, полученных дистанционно с использованием Автоматизированного Технического Средства для АЭроМониторинга (АТСАЭМ). АТСАЭМ может эффективно контролировать молодые лесные насаждения (МЛН) как с позиции эффективного управления МЛН [7–9], так как они могут нести лидарные датчики и мультиспектральные камеры с высоким пространственным разрешением [7], создавая фотограмметрические мозаики и цифровые модели поверхности (Digital Surface Models – DSM) [10]. Основными показателями мониторинга линейных МЛН является плотность и жизнеспособность растительных структур непосредственно, которые получаются путем индивидуальной оценки деревьев [1,11,12]. Классификация единичного растительного объекта МЛН, основанная на лидарных и мультиспектральных данных, является недостаточно изученным, но эффективным методом [1,10–17]. Разработка цифровых моделей рельефа и траекторий АТСАЭМ при АЭМЛН экспериментального участка необходимо для согласования параметров точности и дальнейшего прогнозирования тенденций роста и развития деревьев. Воздушные снимки высокого разрешения позволяют быстро и эффективно отслеживать природные процессы, планировать мероприятия по уходу за лесными культурами, разрабатывать 3D-модели дерева в профиле и плане.

В качестве несущей платформы для АТСАЭМ практически всегда используются стандартизированные промышленные БПЛА [1,12,18], выпускаемые, как правило, ведущими производителями DJI (КНР), YUNEEC (Гонконг), Parrot (Франция), Walkera (КНР). При этом практически ни в одном исследовании не производится анализ темпоральных данных и погрешностей пространственного положения АТСАЭМ при движении в условиях помех различной природы и интенсивности, что, несомненно, снижает точность полученных результатов. Более того, получение DTM требует дополнительного вычислительного этапа обработки и может потребовать полевых контрольных точек или ручного разграничения объектов на поверхности. Использование результатов пиксельной классификации единичного дерева по лидарным и гиперспектральным данным (pixel-based individual tree classification ITC) может несколько снижать точность в сравнении с классификацией, базирующейся на извлечении спектра на уровне кроны дерева (crone-based individual tree classification ITC). Использование в качестве алгоритма классификации спектральных углов (Spectral Angle Mapper - SAM) также может снижать точность на 5-7 % по сравнению с использованием машины опорных векторов (Support Vector Machine - SVM).

Совершенствование процессов управления [19,20] АТСАЭМ при выполнении операций дистанционного мониторинга [21–23] молодых лесных насаждений должно осуществляться с помощью разработки «*алгоритмов нелинейной фильтрации параметров углового движения* [24]». Это обусловлено резким ухудшением точности работы спутниковой навигационной системы в условиях горного рельефа, под пологом леса, при высоком уровне атмосферных помех, при многократных отражениях в условиях движения в лесных насаждениях, а также неизбежными инструментальными погрешностями передатчика спутника и приемника объекта.

Таким образом, целью работы явилось исследование эффективности начальной ориентации АТСАЭМ четырехроторной аэродинамической схемы при выполнении операций мониторинга молодых лесных насаждений экспериментального участка ЗКС-сеянцев (1+0, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation, *Pinus sylvestris* L.) с разработкой методики оценки высоты единичных растительных объектов МЛН.

Материалы и методы

Экспериментальный участок линейных насаждений молодых деревьев (container-grown 1+0, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation, *Pinus sylvestris* L.) расположен в Левобережном лесничестве Учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ рядом с кордоном Кожевенный (табл. 1, рис. 1).

Таблица 2

Планово-высотные реперные точки (RP), ограничивающие экспериментальный участок

Table 2

Planned-altitude reference points (RP) limiting the experimental site

Наименование | Name	Широта, ° | Latitude, °	Долгота, ° | Longitude, °	Высота над уровнем моря, м | Altitude a.s.l., m
База GNSS | GNSS-base	51.827950336	39.364086081	116.5084
Взлетная площадка | Take-off	51.827861321	39.363992235	111.9234
Реперная точка 1 | RP-1	51.827799098	39.363933282	116.6316
Реперная точка 2 | RP-2	51.827659153	39.364832512	117.4000
Реперная точка 3 | RP-3	51.827332256	39.364663848	118.3461
Реперная точка 4 | RP-4	51.827494285	39.363602841	115.7445

Источник: собственные измерения автора

Source: own measurements

Рисунок 1. Экспериментальный участок для разработки методики оценки биометрических параметров молодых лесных насаждений: 1 – взлетная площадка 60 * 80 см; 2 – АТСАЭМ на базе TOPODRONE DJI Mavic 2 Pro PPK Upgrade Kit четырырехроторной аэродинамической схемы; 3 – начальная выставка и взлет АТСАЭМ; 4 – GNSS-станция Emlid Reach RS2 7; 5 – АТСАЭМ на полетной высоте; 6 – вид с камеры АТСАЭМ (разрешение 0,28 см / пиксель); 7 – реперная точка диаметром 20 см; 8 – возвращение АТСАЭМ на взлетную площадку для перезарядки аккумуляторов: 9 – расположение реперных точек, взлетной площадки и GNSS-баз на карте Google Earth.

Figure 1. Experimental site for the development of a methodology for evaluating biometric parameters of young forest stands: 1 – 60 * 80 cm take–off pad; 2 – ATSAEM based on TOPODRONE DJI Mavic 2 Pro PPK Upgrade Kit of a four–rotor aerodynamic scheme; 3 - initial exhibition and take–off of ATSAEM; 4 – GNSS Emlid Reach RS2 7 station; 5 – ATSAEM at flight altitude; 6 - view from the ATSAEM camera (resolution 0.28 cm/pixel); 7 - reference point with a diameter of 20 cm; 8 - return of the ATSAEM to the take-off pad to recharge the batteries: 9 - location of reference points, the take-off pad and GNSS bases on the Google Earth map

Источник: собственная композиция автора

Source: author’s composition

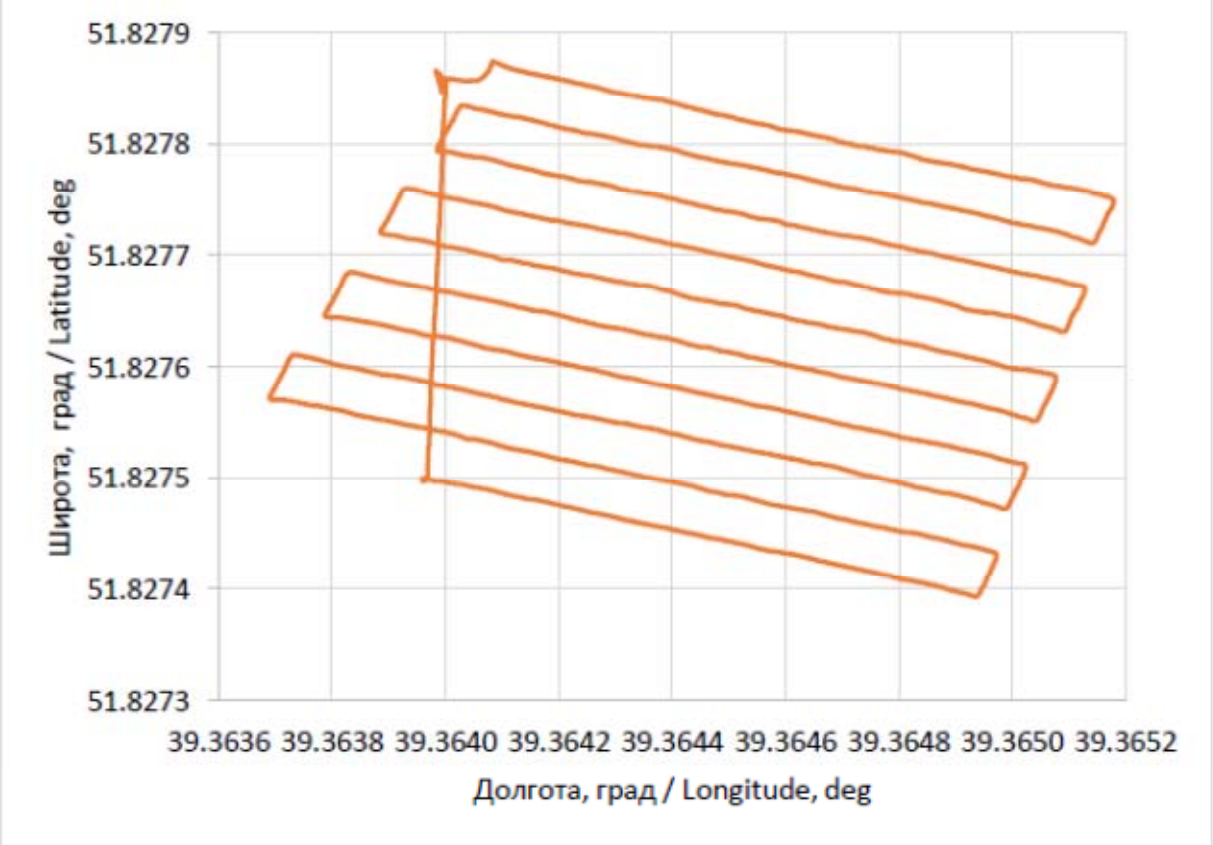


Рисунок 2. Траектория полета АТСАЭМ над линейными МЛН
Figure 2. The trajectory of the ATSAEM flight over linear forest crops
Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

После получения документов, разрешающих проведение полета и аэрофотосъёмки, составили план полета и произвели начальную юстировку, используя программное обеспечение DJI Pilot. Рассчитали требуемое время полета, дистанцию, расширение получаемых снимков и максимальную скорость полета. 10 июля 2021 года оценили прогноз погоды, используя онлайн-сервис, Yandex Pogoda. БПЛА имеют ограничения по силе ветра, температуре и не могут проводить мониторинг во время дождя. В нашем случае DJI Mavic 2pro способен работать при температуре не ниже +0 С°, и ветре до 11 м/с.

Для точной привязки аэрофотографий к местности использовали опознаки (реперные точки RP на рис. 1) по ГОСТ Р 59328-2021, которые до начала полета закрепили на исследуемой площади в количестве четырех штук, расположенных по периметру снимаемой площади. Выполнили сьёмку их координат с помощью геодезического приёмника.

Используя этот же геодезический приёмник, установили его на базовую точку и запустили на приём GPS сигнала в течении всего времени полета БПЛА (траектория приведена на рис. 2), выполнили полетное задание. Время аэрофотосъёмки в нашем случае превысило время работы БПЛА на одном аккумуляторе поэтому он в автоматическом режиме вернулся на базу, была проведена замена аккумулятора и продолжен план полета.

Всего на экспериментальной площади в автоматическом режиме была отснята 421 фотография. Оценку геометрической и семантической информации о растительных объектах осуществляли по вновь разработанной методике, результатом реализации которой явились 78 сечений (рис. 3) условной высотной фотограмметрической модели линейного насаждения. Основная последовательность методики:

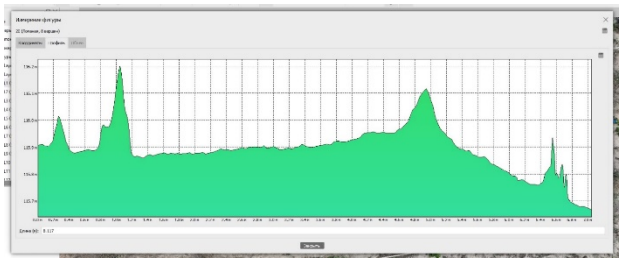


Рисунок 3. Сечение облака точек высотной фотограмметрической модели
Figure 3. Cross section of a point cloud of a high-altitude photogrammetric model
Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

1. Добавили в свойства каждой фотографии, используя Agisoft Metashape Professional, её точные координаты на основании синхронизированных по времени данных GNSS базовой станции и приемника средств управления АТСАЭМ. Результатом обработки является облако точек и четыре реперные точки, показанные на рис. 4.

Рисунок 4. Облако точек экспериментального участка с реперными точками RP1-RP4
Figure 4. The point cloud of the experimental site with reference points RP1-RP4
Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

2. На основании облака точек строили цифровую модель местности, где цветовой палитрой показаны высоты. На модели видно, что сам экспериментальный участок имеет возвышенности, которые по абсолютной величине превышают высоту растительных объектов (деревьев). Разбили цифровую модель местности на участки и на каждом участке в ручном режиме нарисовали линии, проходящие по рядкам лесных культур. Каждая точка линии рядка поставлена у начала и конца проекции кроны молодого дерева (рис. 5).

3. На основании цифровой модели экспериментального участка были получены линии уровня, характеризующие высоту объектов, но в связи с тем, что линии проходят и фиксируют высоту не только лесных культур, а также перепадов борозды (0,2-0,4 м), высоту рельефа, пней и т.д., использовать их для анализа является затруднительным (рис. 6).

4. Для получения линейной высотной фотограмметрической модели молодых деревьев сосны обыкновенной были использованы линии, указанные на рис. 6. Каждая линия была пронумерована в соответствии с строкой и столбцом. Для каждой линии получили сечения облака точек (см. рис. 3), которое позволяет определить взаимное расположение и высоту лесных культур.

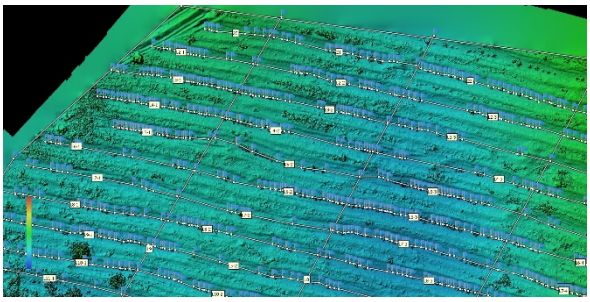


Рисунок 5. Цифровая модель с подеревной разметкой произрастания молодых лесных культур сосны обыкновенной на экспериментальном участке
Figure 5. Digital model of the area of growth of Scots pine forest crops at the experimental site
Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

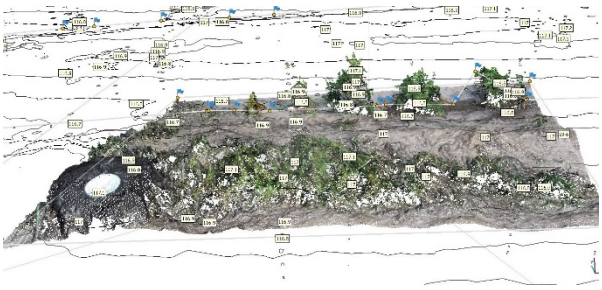


Рисунок 6. Линии уровня, характеризующие высоту ландшафта на экспериментальном участке
Figure 6. Digital model of the area of growth of Scots pine forest crops at the experimental site
Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Оценку параметров предполетной ориентации средств управления АТСАЭМ при мониторинге молодых лесных насаждений осуществили чис-

ленным моделированием методом Рунге-Кутты среднеквадратического отклонения прецессии α, нутации β и собственного вращения γ АТСАЭМ от вероятностных значений без фильтрации и с применением расширенного фильтра Калмана. Используя пакет прикладных программ IBM SPSS Statistics v. 25, оценили дескриптивную статистику пространственно-темпоральных данных АТСАЭМ и визуализировали их диаграммой «box plot».

Результаты и обсуждение

Пространственно-временные характеристики АТСАЭМ, представленные на рис. 7, дают возможность заключить, что средняя высота полета АТСАЭМ относительно уровня моря практически совпадает с медианным значением и составляет 122,951 ± 0,155 м. При этом на отметке в 650 тыс. мс (около 11 мин) явно виден интенсивный скачок высоты НУМ к верхнему пределу.

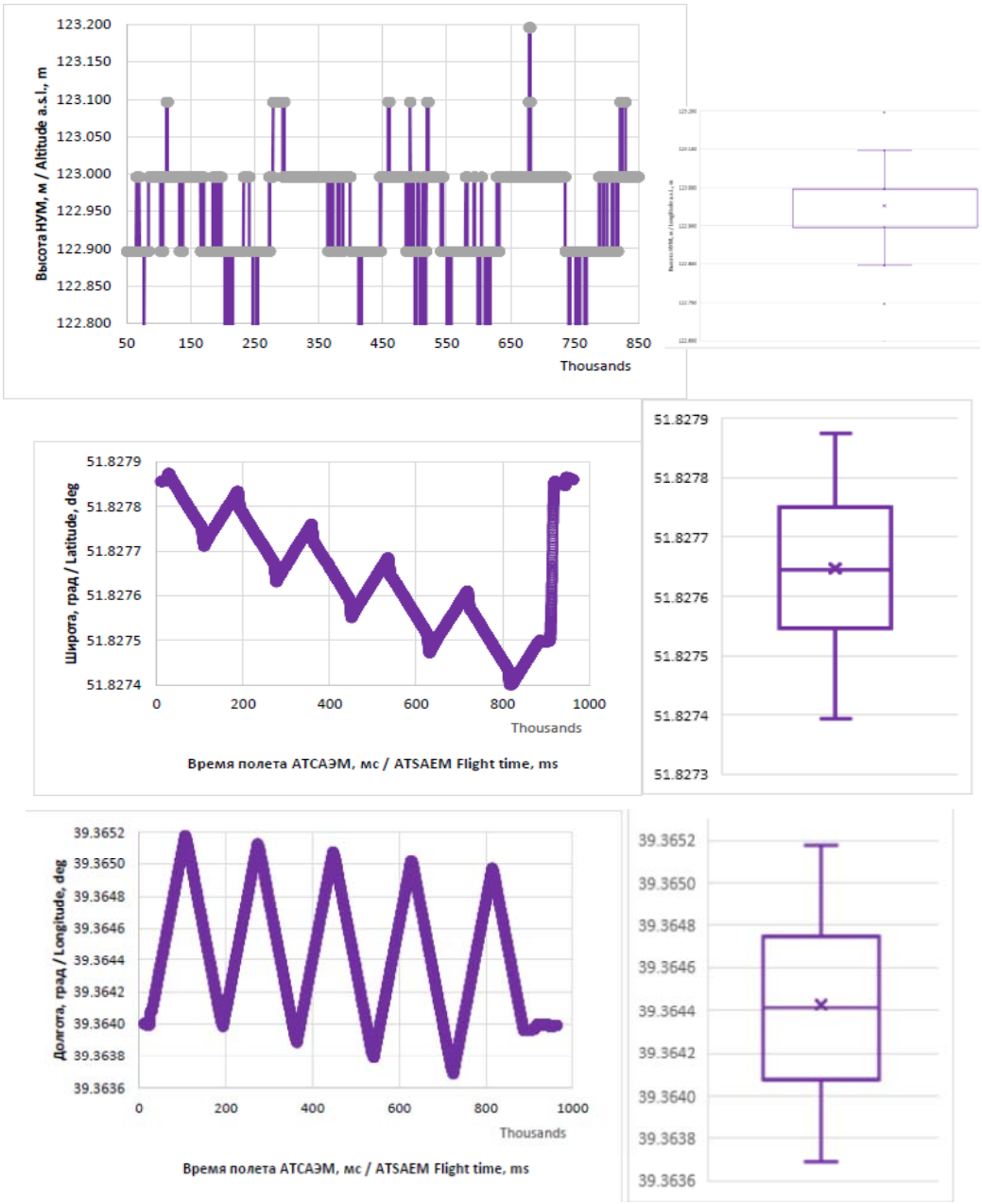


Рисунок 7. Пространственно-временные характеристики АТСАЭМ при мониторинге экспериментального участка
Figure 7. Spatio-temporal characteristics of the ATSAEM during monitoring of the experimental site
Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Такие колебания могут несколько изменить фокусное расстояние, однако наличие жестко фиксированного на бесконечность по ГОСТ Р 59328-2021 фокуса аэрофотокамеры могут нивелировать точность. Средняя варианта северной широты за весь рассматриваемый полет совпадает в медианным значением и составляет 51,82765 ± 0,00005°, а средняя варианта восточной долготы несколько выше медианного значения и составляет 39,36442 ± 0,00035°.

Используем для оценки начальной выставки АТСАЭМ метод гирокомпасирования [25]. Азимут начального положения оси чувствительности датчика угловой скорости АТСАЭМ относительно плоскости местного меридиана (с широтой 51°29’) был выбран равным 26°-27°, а шаг выборки d для вычисления всех возможных значений углов A_n в диапазоне [0, π/2] был выбран равным 10". При численном моделировании шум измерения датчика угловой скорости АТСАЭМ моделировали как сумму постоянного случайного дрейфа S с нулевым ожиданием, дисперсией $(0,15)^2$ °/ч и широкополосного шума W (гауссова случайная последовательность с нулевым ожиданием и дисперсией $(0,15)^{2}$°/ч), генерируемого с шагом 0,01 с для числа реализаций, равного 90.

Минимальные значения ошибок определения азимутальной оси чувствительности датчика угловой скорости при различных азимутах ее начального положения 26°10′, 26°20′, 26°30′, 26°40′, 26°50′ составили соответственно 7.2”, 9.3”, 6,5”, 8.3” и 6,6”.

При оценке начальной выставки АТСАЭМ с использованием расширенного фильтра Калмана и уточненного алгоритма среднеквадратическая ошибка оценивания прецессии, нутации и собственного вращения не превысила 0.003584 рад (рис. 8). Причем максимальная ошибка была выявлена при оценке рецессии, а минимальная – при оценке собственного вращения.

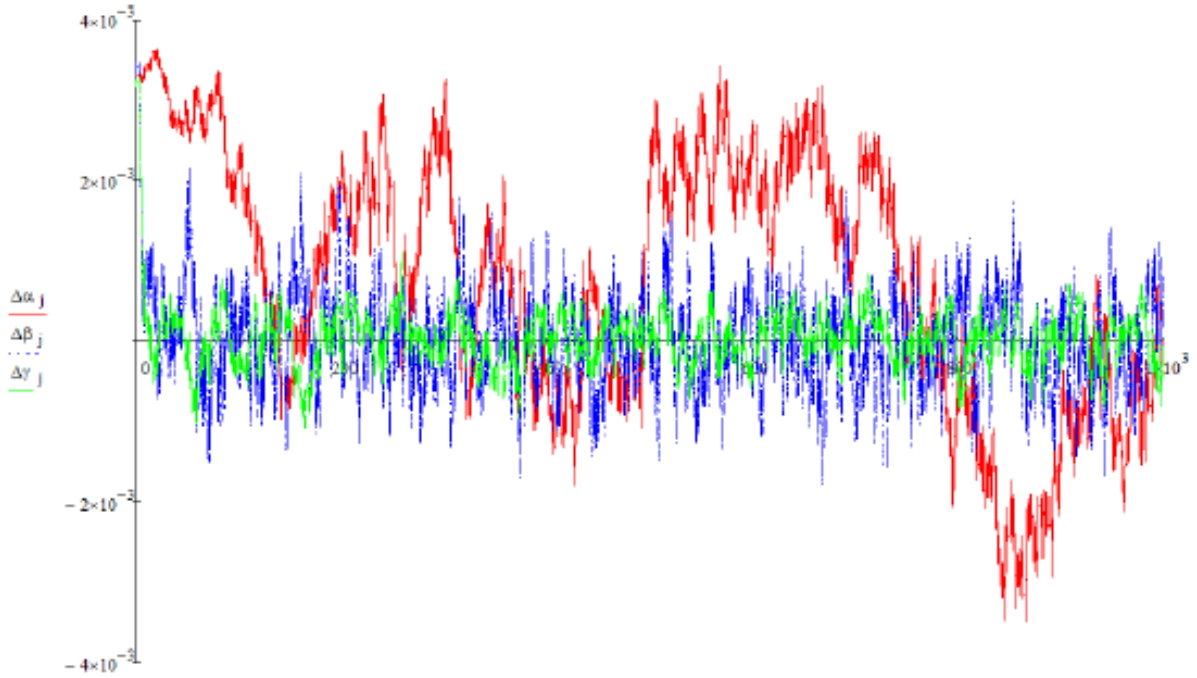


Рисунок 8. Ошибки оценки углов Эйлера-Крылова в рад при уменьшении уровня помех

Figure 8. Errors in estimating Euler-Krylov angles in rad when the noise level decreases

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

Выводы

1. Разработан эффективный метод АТСАЭМ-оценки биометрических параметров молодого дерева сосны обыкновенной с использованием сечений облака точек высотной фотограмметрической модели.

2. Минимальное значение ошибки при определении азимута оси чувствительности датчика угловой скорости при предполетной ориентации АТСАЭМ в начало строки с деревьями для оценки биометрических параметров составило 6,6”, а максимальное не превышало 9,3”.

3. Среднеквадратическая ошибка оценивания прецессии, нутации и собственного вращения АТСАЭМ при начальной выставке с использованием нелинейного расширенного фильтра Калмана и уточненного алгоритма для не превысила 0.003584 рад.

Список литературы

1. Zhao, D.; Pang, Y.; Liu, L.; Li, Z. Individual Tree Classification Using Airborne LiDAR and Hyperspectral Data in a Natural Mixed Forest of Northeast China. *Forests* **2020**, *11*, 303, doi:10.3390/f11030303.
2. Tikkinen, M.; Riikonen, J.; Luoranen, J. Covering Norway spruce container seedlings with reflective shading cloth during field storage affects seedling post-planting growth. *New For.* **2021**, doi:10.1007/s11056-021-09876-9.
3. Pikkarainen, L.; Luoranen, J.; Peltola, H. Early Field Performance of Small-Sized Silver Birch and Scots Pine Container Seedlings at Different Planting Depths. *Forests* **2021**, *12*, 519, doi:10.3390/f12050519.
4. Do, H.T.T.; Zimmer, H.C.; Vanclay, J.K.; Grant, J.C.; Trinh, B.N.; Nguyen, H.H.; Nichols, J.D. Site form classification—a practical tool for guiding site-specific tropical forest landscape restoration and management. *For. An Int. J. For. Res.* **2021**, doi:10.1093/forestry/cpab046.
5. Novikov, A.I. Forest restoration method. RU Patent 2 714 705, 20 May 2019 2019.
6. Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W.; Chipman, J.W. *Remote Sensing and Image Interpretation*; 7th ed.; Whiley: Hoboken, NJ, USA, 2015; ISBN 9781118343289.
7. Kampen, M.; Vienna, L.S.; Immitzer, M.; Vienna, L.S. UAV-Based Multispectral Data for Tree Species Classification and Tree Vitality Analysis. In Proceedings of the Dreilandertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Osterreich – Publikationen der DGPF, Band 28; 2019; pp. 623–639.
8. Albuquerque, R.W.; Costa, M.O.; Ferreira, M.E.; Carrero, G.C.; Grohmann, C.H. Remotely piloted aircraft imagery for automatic tree counting in forest restoration areas: a case study in the Amazon. *J. Unmanned Veh. Syst.* **2020**, *8*, 207–223, doi:10.1139/juvs-2019-0024.
9. Zahawi, R.A.; Dandois, J.P.; Holl, K.D.; Nadwodny, D.; Reid, J.L.; Ellis, E.C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biol. Conserv.* **2015**, *186*, 287–295, doi:10.1016/j.biocon.2015.03.031.
10. Seidel, D.; Annighöfer, P.; Ehbrecht, M.; Magdon, P.; Wöllauer, S.; Ammer, C. Deriving Stand Structural Complexity from Airborne Laser Scanning Data—What Does It Tell Us about a Forest? *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1854, doi:10.3390/rs12111854.
11. Jia, W.; Pang, Y.; Tortini, R.; Schläpfer, D.; Li, Z.; Roujean, J.-L. A Kernel-Driven BRDF Approach to Correct Airborne Hyperspectral Imagery over Forested Areas with Rugged Topography. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 432, doi:10.3390/rs12030432.
12. Ma, Z.; Pang, Y.; Wang, D.; Liang, X.; Chen, B.; Lu, H.; Weinacker, H.; Koch, B. Individual Tree Crown Segmentation of a Larch Plantation Using Airborne Laser Scanning Data Based on Region Growing and Canopy Morphology Features. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1078, doi:10.3390/rs12071078.
13. Lu, H.; Pang, Y.; Li, Z.; Chen, B. An Automatic Range Ambiguity Solution in High-Repetition-Rate Airborne Laser Scanner Using Priori Terrain Prediction. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2015**, *12*, 2232–2236, doi:10.1109/LGRS.2015.2461441.

14. Pang, Y.; Li, Z.; Ju, H.; Lu, H.; Jia, W.; Si, L.; Guo, Y.; Liu, Q.; Li, S.; Liu, L.; et al. LiCHy: The CAF's LiDAR, CCD and Hyperspectral Integrated Airborne Observation System. *Remote Sens.* **2016**, *8*, 398, doi:10.3390/rs8050398.

15. Liu, L.; Coops, N.C.; Aven, N.W.; Pang, Y. Mapping urban tree species using integrated airborne hyperspectral and LiDAR remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* **2017**, *200*, 170–182, doi:10.1016/j.rse.2017.08.010.

16. Pang, Y.; Meng, S.; Li, Z. Temperate Forest Aboveground Biomass Estimation Using Fourier-Based Textural Ordination (FOTO) Indices from High Resolution Aerial Optical Image. *Linye Kexue/Scientia Silvae Sin.* **2017**, 94–104, doi:10.11707/j.1001-7488.20170311.

17. Chen, B.; Pang, Y.; Li, Z.; Lu, H.; North, P.; Rosette, J.; Yan, M. Forest signal detection for photon counting LiDAR using Random Forest. *Remote Sens. Lett.* **2020**, *11*, 37–46, doi:10.1080/2150704X.2019.1682708.

18. Pang, Y.; Liang, X.; Jia, W.; Si, L.; Yan, G.; Shi, J. The comprehensive airborne remote sensing experiment in Saihanba forest farm. *Yaogan Xuebao/Journal Remote Sens.* **2021**, *25*, 904–917, doi:10.11834/jrs.20210222.

19. Sokolov, S. V.; Novikov, A.I. Adaptive estimation of UVs navigation parameters by irregular inertial-satellite measurements. *Int. J. Intell. Unmanned Syst.* **2021**, *9*, 274–282, doi:10.1108/IJIUS-10-2019-0056.

20. Manin, A.A.; Sokolov, S. V.; Novikov, A.I.; Polyakova, M. V.; Demidov, D.N.; Novikova, T.P. Kalman Filter Adaptation to Disturbances of the Observer's Parameters. *Inventions* **2021**, *6*, 80, doi:10.3390/inventions6040080.

21. Safonova, A.; Hamad, Y.; Dmitriev, E.; Georgiev, G.; Trenkin, V.; Georgieva, M.; Dimitrov, S.; Iliev, M. Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of Vital Status of Forest Stands from UAV Images. *Drones* **2021**, *5*, 77, doi:10.3390/drones5030077.

22. Liu, W.C.; Lu, C.H.; Huang, W.C. Large-scale particle image velocimetry to measure streamflow from videos recorded from unmanned aerial vehicle and fixed imaging system. *Remote Sens.* **2021**, *13*, doi:10.3390/rs13142661.

23. Mohan, M.; Richardson, G.; Gopan, G.; Aghai, M.M.; Bajaj, S.; Galgamuwa, G.A.P.; Vastaranta, M.; Arachchige, P.S.P.; Amorós, L.; Corte, A.P.D.; et al. UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 2596, doi:10.3390/rs13132596.

24. Sokolov, S. V.; Novikov, A.I. Development tendency of sowing air operating technology by unmanned aerial vehicles in artificial reforestation. *For. Eng. J.* **2017**, *7*, 190–205, doi:10.12737/article_5a3d040dc79c79.94513194.

25. Sokolov, S. V.; Novikov, A.; Ivetić, V. Determining the initial orientation for navigation and measurement systems of mobile apparatus in reforestation. *Inventions* **2019**, *4*, 56, doi:10.3390/inventions4040056.

References

1. Zhao, D.; Pang, Y.; Liu, L.; Li, Z. Individual Tree Classification Using Airborne LiDAR and Hyperspectral Data in a Natural Mixed Forest of Northeast China. *Forests* **2020**, *11*, 303, doi:10.3390/f11030303.

2. Tikkinen, M.; Riikonen, J.; Luoranen, J. Covering Norway spruce container seedlings with reflective shading cloth during field storage affects seedling post-planting growth. *New For.* **2021**, doi:10.1007/s11056-021-09876-9.

3. Pikkarainen, L.; Luoranen, J.; Peltola, H. Early Field Performance of Small-Sized Silver Birch and Scots Pine Container Seedlings at Different Planting Depths. *Forests* **2021**, *12*, 519, doi:10.3390/f12050519.

4. Do, H.T.T.; Zimmer, H.C.; Vanclay, J.K.; Grant, J.C.; Trinh, B.N.; Nguyen, H.H.; Nichols, J.D. Site form classification—a practical tool for guiding site-specific tropical forest landscape restoration and management. *For. An Int. J. For. Res.* **2021**, doi:10.1093/forestry/cpab046.

5. Novikov, A.I. Forest restoration method. RU Patent 2 714 705, 20 May 2019 2019.

6. Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W.; Chipman, J.W. *Remote Sensing and Image Interpretation*; 7th ed.; Whiley: Hoboken, NJ, USA, 2015; ISBN 9781118343289.

7. Kampen, M.; Vienna, L.S.; Immitzer, M.; Vienna, L.S. UAV-Based Multispectral Data for Tree Species Classification and Tree Vitality Analysis. In Proceedings of the Dreilandertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Osterreich – Publikationen der DGPF, Band 28; 2019; pp. 623–639.

8. Albuquerque, R.W.; Costa, M.O.; Ferreira, M.E.; Carrero, G.C.; Grohmann, C.H. Remotely piloted aircraft imagery for automatic tree counting in forest restoration areas: a case study in the Amazon. *J. Unmanned Veh. Syst.* **2020**, *8*, 207–223, doi:10.1139/juvs-2019-0024.

9. Zahawi, R.A.; Dandois, J.P.; Holl, K.D.; Nadwodny, D.; Reid, J.L.; Ellis, E.C. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biol. Conserv.* **2015**, *186*, 287–295, doi:10.1016/j.biocon.2015.03.031.

10. Seidel, D.; Annighöfer, P.; Ehbrecht, M.; Magdon, P.; Wöllauer, S.; Ammer, C. Deriving Stand Structural Complexity from Airborne Laser Scanning Data—What Does It Tell Us about a Forest? *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1854, doi:10.3390/rs12111854.

11. Jia, W.; Pang, Y.; Tortini, R.; Schläpfer, D.; Li, Z.; Roujean, J.-L. A Kernel-Driven BRDF Approach to Correct Airborne Hyperspectral Imagery over Forested Areas with Rugged Topography. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 432, doi:10.3390/rs12030432.

12. Ma, Z.; Pang, Y.; Wang, D.; Liang, X.; Chen, B.; Lu, H.; Weinacker, H.; Koch, B. Individual Tree Crown Segmentation of a Larch Plantation Using Airborne Laser Scanning Data Based on Region Growing and Canopy Morphology Features. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1078, doi:10.3390/rs12071078.

13. Lu, H.; Pang, Y.; Li, Z.; Chen, B. An Automatic Range Ambiguity Solution in High-Repetition-Rate Airborne Laser Scanner Using Priori Terrain Prediction. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2015**, *12*, 2232–2236, doi:10.1109/LGRS.2015.2461441.

14. Pang, Y.; Li, Z.; Ju, H.; Lu, H.; Jia, W.; Si, L.; Guo, Y.; Liu, Q.; Li, S.; Liu, L.; et al. LiCHy: The CAF's LiDAR, CCD and Hyperspectral Integrated Airborne Observation System. *Remote Sens.* **2016**, *8*, 398, doi:10.3390/rs8050398.

15. Liu, L.; Coops, N.C.; Aven, N.W.; Pang, Y. Mapping urban tree species using integrated airborne hyperspectral and LiDAR remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* **2017**, *200*, 170–182, doi:10.1016/j.rse.2017.08.010.

16. Pang, Y.; Meng, S.; Li, Z. Temperate Forest Aboveground Biomass Estimation Using Fourier-Based Textural Ordination (FOTO) Indices from High Resolution Aerial Optical Image. *Linye Kexue/Scientia Silvae Sin.* **2017**, 94–104, doi:10.11707/j.1001-7488.20170311.

17. Chen, B.; Pang, Y.; Li, Z.; Lu, H.; North, P.; Rosette, J.; Yan, M. Forest signal detection for photon counting LiDAR using Random Forest. *Remote Sens. Lett.* **2020**, *11*, 37–46, doi:10.1080/2150704X.2019.1682708.

18. Pang, Y.; Liang, X.; Jia, W.; Si, L.; Yan, G.; Shi, J. The comprehensive airborne remote sensing experiment in Saihanba forest farm. *Yaogan Xuebao/Journal Remote Sens.* **2021**, *25*, 904–917, doi:10.11834/jrs.20210222.

19. Sokolov, S. V.; Novikov, A.I. Adaptive estimation of UVs navigation parameters by irregular inertial-satellite measurements. *Int. J. Intell. Unmanned Syst.* **2021**, *9*, 274–282, doi:10.1108/IJIUS-10-2019-0056.

20. Manin, A.A.; Sokolov, S. V.; Novikov, A.I.; Polyakova, M. V.; Demidov, D.N.; Novikova, T.P. Kalman Filter Adaptation to Disturbances of the Observer's Parameters. *Inventions* **2021**, *6*, 80, doi:10.3390/inventions6040080.

21. Safonova, A.; Hamad, Y.; Dmitriev, E.; Georgiev, G.; Trenkin, V.; Georgieva, M.; Dimitrov, S.; Iliev, M. Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of Vital Status of Forest Stands from UAV Images. *Drones* **2021**, *5*, 77, doi:10.3390/drones5030077.

22. Liu, W.C.; Lu, C.H.; Huang, W.C. Large-scale particle image velocimetry to measure streamflow from videos recorded from unmanned aerial vehicle and fixed imaging system. *Remote Sens.* **2021**, *13*, doi:10.3390/rs13142661.

23. Mohan, M.; Richardson, G.; Gopan, G.; Aghai, M.M.; Bajaj, S.; Galgamuwa, G.A.P.; Vastaranta, M.; Arachchige, P.S.P.; Amorós, L.; Corte, A.P.D.; et al. UAV-Supported Forest Regeneration: Current Trends, Challenges and Implications. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 2596, doi:10.3390/rs13132596.

24. Sokolov, S. V.; Novikov, A.I. Development tendency of sowing air operating technology by unmanned aerial vehicles in artificial reforestation. *For. Eng. J.* **2017**, *7*, 190–205, doi:10.12737/article_5a3d040dc79c79.94513194.

25. Sokolov, S. V.; Novikov, A.; Ivetić, V. Determining the initial orientation for navigation and measurement systems of mobile apparatus in reforestation. *Inventions* **2019**, *4*, 56, doi:10.3390/inventions4040056.

Сведения об авторе

✉ *Демидов Дмитрий Николаевич* – аспирант ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1006-2881, e-mail: dnd.vgltu@mail.ru.

Information about the author

✉ *Dmitriy N. Demidov* – Postgraduate Student (Tech.), Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, 8, Timiryazeva, Voronezh 394087, Russian Federation, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1006-2881, e-mail: dnd.vgltu@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10

УДК 630*.232.42

НОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЛЕСОПАСАДОЧНЫХ МАШИН ДЛЯ ПОСАДКИ СЕЯНЦЕВ С ОТКРЫТОЙ И ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ

Михаил В. Драпалюк[1], md@vglta.vrn.ru, 0000-0002-8029-2706
Владимир В. Стасюк[1], stasiuk.volodya@yandex.ru, 0000-0002-8689-955X
Владимир А. Зеликов[1] ✉, zelikov-vrn@mail.ru, 0000-0003-2317-9413

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

В настоящее время в Российской Федерации большое количество площадей требуют лесовосстановления. Введение новых технологий в искусственном лесовосстановлении (посадка сеянцев с закрытой корневой системой) требует применения новых средств механизации при посадке сеянцев. Оценку степени сходства и различия отобранных конструкций проводили на основе статистического анализа – иерархической классификации. Промышленность страны практически не производит лесопосадочные машины для посадки сеянцев с закрытой корневой системой. Импортные образцы лесопосадочных машин дороги, требуют агрегатирования с тяжелой техникой, которая в лесных хозяйствах практически отсутствует, кроме того, ограничением в использовании импортной техники могут быть и климатические условия. В связи с вышеперечисленным в Воронежском государственном лесотехническом университете были разработаны конструкции универсальных лесопосадочных машин с ротационным и цепным посадочными механизмами, которые позволят осуществлять посадку как обычных сеянцев, так и сеянцев с закрытой корневой системой. Использование универсальных лесопосадочных машин в лесных хозяйствах позволит содержать одну лесопосадочную машину вместо двух специализированных, это позволит значительно сэкономить на обслуживании и хранении механизмов.

Ключевые слова: лесопосадочная машина, лесовосстановление, посадочный материал, посадочный аппарат.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Драпалюк, М. В. Новые конструкции универсальных лесопасадочных 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. – *Библиогр.: с. 119–123 (26 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10.

Поступила: 22.10.2021 ***Принята к публикации***: 15.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

NEW DESIGNS OF UNIVERSAL PLANTING MACHINES FOR PLANTING SEEDLINGS WITH OPEN AND CLOSED ROOT SYSTEMS

Mikhail V. Drapalyuk[1], md@vglta.vrn.ru, 0000-0002-8029-2706
Vladimir V. Stasyuk[1], stasiuk.volodya@yandex.ru, 0000-0002-8689-955X
Vladimir A. Zelikov[1] ✉, zelikov-vrn@mail.ru, 0000-0003-2317-9413

[1] *FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, 8 Timiryazeva street, Voronezh, Russian Federation*

Abstract

Currently, in the Russian Federation, a large number of areas require reforestation. Introduction of new technologies in artificial reforestation (planting seedlings with a closed root system) requires the use of new means of mechanization when planting seedlings. The assessment of the degree of similarity and difference of the selected structures was carried out on the basis of statistical analysis (hierarchical classification). The country's industry practically does not produce tree planting machines for planting seedlings with a closed root system. Imported specimens of forest planting machines are expensive, require aggregation with heavy equipment, which is practically absent in forestry. In addition, climatic conditions may also be a limitation in the use of imported equipment. In connection with the above, Voronezh State University of Forestry and Technologies has developed designs of universal planting machines with rotary and chain planting mechanisms. They enable planting of both standard seedling and seedlings with closed root system. The use of universal tree planting machines in forestry enables to keep one tree planting machine instead of two specialized ones. This will significantly save on maintenance and storage of mechanisms.

Keywords: tree planting machine, reforestation, planting material, planting attachment.

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

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

***For citation*:** Drapalyuk M. V., Stasyuk V. V., Zelikov V. A. (2021) New designs of universal forest planting machines for planting seedlings with an open and closed root system. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 112-123 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/10.

Received: 22.10.2021 ***Revised:*** 30.11.2021 ***Accepted for publication***: 15.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

Площадь вырубаемых и погибающих в пожарах лесных насаждений на территории Российской Федерации по разным данным приближается к четырем миллионам гектаров в год [1, 2, 3, 4]. Площадь искусственного лесовосстановления значительно отстает от темпов убытия, по официальным данным составляет 800–900 тыс. гектаров в год [5]. Подобная ситуация наблюдалась много лет подряд. Площади, требующие лесовосстановления, постоянно увеличиваются [2, 6, 7].

По этой причине в национальном проекте «Экология» 2019–2024 значительное внимание уделяется именно лесовосстановлению. В частности, предлагается изменить баланс выбытия (вследствие пожаров, повреждения насекомыми, промышленной вырубки, а также незаконной вырубки) и воспроизводства лесов (методами естественного, а главное, искусственного лесовосстановления) с 62,3 % в 2018 году до 100 % к 2024 году [1, 8, 9].

В 2021 году Правительством Российской Федерации принята Стратегия развития лесного

комплекса Российской Федерации до 2030 года, в которой по базовому варианту к 2024 году, а по инерционному – к 2030 году баланс воспроизводства лесов в Российской Федерации должен быть 100 % [6, 9].

В связи с этим в Российской Федерации активно внедряются прогрессивные методы искусственного лесовосстановления, в частности, посадка сеянцев с закрытой корневой системой [9, 10]. В соответствии с национальным проектом к 2030 году до 45 % площадей искусственного лесовосстановления должно воспроизводиться сеянцами с закрытой корневой системой [9, 11].

Зарубежный опыт применения технологии посадки сеянцев с закрытой корневой системой довольно богат. Посадку растений с комом почвы начали практиковать в скандинавских странах с 60-х годов XX века.

На данный момент в таких странах, как Швеция, Финляндия, Норвегия, Канада и некоторых других восстановление лесов производится в основном сеянцами с закрытой корневой системой [12, 13].

Данная технология лесовосстановления особенно хорошо зарекомендовала себя во влажном климате, на болотистых почвах скандинавских стран [9, 14].

Технология посадки сеянцев с закрытой корневой системой позволяет добиться высокой приживаемости (вследствие хорошей сохранности корневой системы сеянцев в процессе перевозки и посадки) после высадки в неблагоприятных условиях за счет некоторого запаса питательных веществ в субстрате возле корней. Кроме того, расширяются сроки ведения посадочных работ, так как сеянцы с закрытой корневой системой можно высаживать на протяжении всего периода вегетации [9, 14, 15].

В Российской Федерации использование технологии посадки сеянцев и саженцев с закрытой корневой системой началось значительно позже. Так, например, в Воронежской области выращивание таких сеянцев и саженцев в теплицах началось в 2012 году [16]. Темпы внедрения данного метода лесовосстановления в лесных хозяйствах до сих пор крайне низкие [14].

Слабое распространение технологии посадки сеянцев с закрытой корневой системой обусловлено сразу несколькими объективными причинами.

Посадочный материал с закрытой корневой системой изначально дороже обычного в два-четыре раза [16].

Ручная посадка сеянцев с комом почвы по трудоемкости выше, так как объем и вес сеянцев с закрытой корневой системой значительно больше веса и объема обычных сеянцев с отрытой корневой системой. В связи с большим весом посадочного материала увеличивается и трудоемкость доставки его до мест посадки.

Механизированная посадка сеянцев с закрытой корневой системой на территории Российской Федерации почти не применяется. Отечественная промышленность практически не выпускает подобную технику [17, 18].

В настоящее время лесные хозяйства Российской Федерации ведут посадку леса как обычными сеянцами, так и сеянцами с закрытой корневой системой. При этом площади посадки сеянцами с закрытой корневой системой будут постепенно увеличиваться и к 2030 году, согласно проекту развития отрасли, должны составить 45%. [11]

Очевидно, что в подобных условиях механизированная посадка леса должна осуществляться универсальными лесопосадочными машинами, которые должны быть способны высаживать как сеянцы с открытой корневой системой, так и сеянцы с закрытой корневой системой. При этом лесопосадочная машина должна быть невысокой стоимости, простой в эксплуатации и обслуживании, не требовать высокой квалификации рабочего персонала [19].

Материалы и методы

В статье рассмотрены современные лесопосадочные машины, а также разработанные и запатентованные конструкции лесопосадочных машин. В качестве методов исследования использовали систематический и патентный поиск. Патентный поиск проводили по базам данных Яндекс.Патенты и Lens.org, используя следующую форму запроса ключевых слов: (reforestation) AND «planting material» OR (planting machine) OR (planting apparatus). Систематический поиск проводили по базам дан-

ных ELibrary.ru и Scopus с формированием следующего алгоритма запроса: (seedling planting) OR (tree planting), а также (машина лесопосадочная) ИЛИ (посадочный аппарат).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика современных конструкций лесопосадочных машин
Table 1 – Comparative characteristics of modern designs of planting machines

№	Тип конструкции Type of construction	Агрегатируется с тракторами Aggregates with tractors	Место посадки Place to plant	Принцип посадки The principle of planting	Материал для посадки Material for planting	Производительность шт/ч Productivity pcs/hour
1	Сажалка брикетов САБ -1А Planting briquettes SUB-1A	3-го тягового класса с номинальным тяговым усилием 30 кН 3rd traction class with a nominal traction force of 30 kN	в борозду into the furrow	Непрерывного действия Continuous operation	Саженцы с ЗКС Seedlings with CRS	500-550
2	Лесопосадочная машина (Патент на полезную модель № 177604 U1) Forest planting machine (Utility model Patent No. 177604 U1)	3-го тягового класса с номинальным тяговым усилием 30 кН 3rd traction class with a nominal traction force of 30 kN	в борозду into the furrow	Непрерывного действия Continuous operation	Сеянцы с ЗКС Seedlings with CRS	Расчетная производительность1000-1200 Estimated capacity 1000-1200
3	Машина для посадки сеянцев и саженцев с закрытой корневой системой (Патент № 2555009 C2) Machine for planting seedlings and seedlings with a closed root system (Patent No. 2555009 C2)	3-го тягового класса с номинальным тяговым усилием 30 кН 3rd traction class with a nominal traction force of 30 kN	в борозду into the furrow	Непрерывного действия Continuous operation	Саженцы и сеянцы с ЗКС Nursery raising with CRS	Расчетная производительность 1000-1200 Estimated capacity 1000-1200
4	Лесопосадочная машина RisutecMP-160 RisutecMP-160 forest planting machine	Экскаватор 14 – 20 тонн Excavator 14 - 20 tons	В лунку Into the hole	Дискретная Discrete	Сеянцы с ЗКС Seedlings with CRS	До 300 Up to 300
5	Лесопосадочная машина M-Planter M-Planter Forest planting machine	Экскаватор 14 – 20 тонн Excavator 14 - 20 tons	В лунку Into the hole	Дискретная Discrete	Сеянцы с ЗКС Seedlings with CRS	До 300 Up to 300
6	Лесопосадочная маш BrackeP11.a Bracke P11.a forest planting chine	Экскаватор 14 – 20 тонн Excavator 14 - 20 tons	В лунку Into the hole	Дискретная Discrete	Сеянцы с ЗКС Seedlings with CRS	До 300 Up to 300
7	Лесопосадочная машина с цепным посадочным аппаратом ВГЛТУ Forest planting machine with chain planting apparatus VGLTU	3-го тягового класса с номинальным тяговым усилием 30 кН 3rd traction class with a nominal traction force of 30 kN	в борозду into the furrow	Непрерывного действия Continuous operation	Саженцы и сеянцы с ЗКС, саженцы и сеянцы с открытой корневой системой Nursery raising with CRS, nursery raising an open root system	Расчетная производительность 1000-1200 Estimated capacity 1000-1200

Источник: собственные данные авторов
Source: authors' own data

Из патентного и систематического поиска были отобраны наиболее релевантные конструкции лесопосадочных машин и оценена степень их сходства и различия по параметрам: агрегатирования с трактором, места посадки, принципа посадки, материала для посадки, производительности.

Оценку степени сходства и различия отобранных конструкций проводили на основе статистического анализа – иерархической классификации – оценивающего удаленность параметров сравнения от центра на основании квадрата эвклидова расстояния методом межгрупповой связи.

Результаты и обсуждение

Сравнительная характеристика наиболее релевантных условиям систематического поиска конструкций лесопосадочных машин представлена в табл. 1, а иерархическая диаграмма на рис. 1.

Анализ статистической диаграммы показывает, что максимально приближены внутри групп (на расстоянии 1,5 от центра) конструкции (5,6,4) и (2,3,7) из табл. 1, образующие две группы машин: А1 и Б1. На расстоянии 2,5 от центра располагаются конструкция 1 и группа А1 (5,6,4), образующие группу А2, что делает их менее схожими по пяти рассматриваемым параметрам из табл. 1.

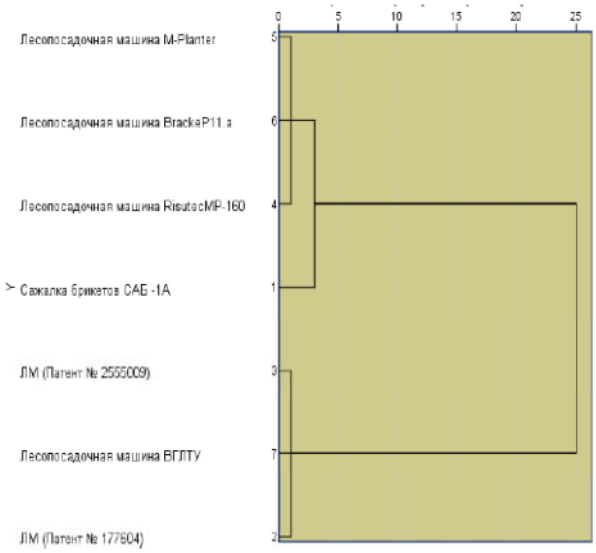


Рисунок 1. Иерархическая диаграмма сходства и различия конструкций лесопосадочных машин

Figure 1. Hierarchical diagram of similarities and differences in the designs of planting machines

Источник: Собственная схема авторов

Source: Authors' ownscheme

Самыми несхожими согласно диаграмме (на уровне 25 от центра) являются группы Б1 и объединенная группа А2. Данный анализ подтверждает наличие схожих достоинств и недостатков в указанных группах, которые более подробно рассмотрены далее.

Разработанные конструкции лесопосадочных машин для посадки сеянцев с закрытой корневой системой имеют ряд недостатков.

Например, машина для посадки саженцев с закрытой корневой системой САБ-1А осуществляет посадку в автоматическом режиме, дисковый сошник создает посадочную щель, в которую при помощи саженцепровода квадратного сечения подаются саженцы, корневая система которых уплотняется прикатывающим катком.

Сажалке присущи определенные недостатки, главным из которых является некачественная посадка вследствие значительного отклонения саженцев от вертикали, нарушения глубины заделки и др. [20].

Лесопосадочная машина для сеянцев с закрытой корневой системой (Патент на полезную модель № 177604 U1) [21] (рис. 2) работает так.

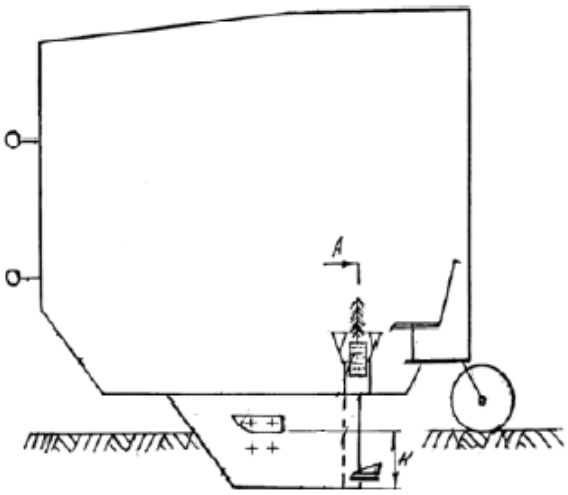


Рисунок 2. Лесопосадочная машина (патент на полезную модель № 177604 РФ)

Figure 2. Forest planting machine patent 177 604 RU

Источник: Патент на полезную модель [21]

Source: Utility model patent [21]

Сошник коробчатой формы выполняет посадочную щель нужной глубины, посадка осуществляется опусканием сеянца по сеянцепроводу под действием силы тяжести. Дно сеянцепровода вы-

полнено под наклоном, задняя стенка имеет вырез, через который сеянец и попадает в борозду. Корневая система уплотняется катками.

Сажалка также несовершенна, сеянец в момент заделки грунтом падает в борозду и никак не контролируется. Глубина посадки сеянца ограничивается глубиной борозды, угол же отклонения от вертикали при посадке может быть значительным.

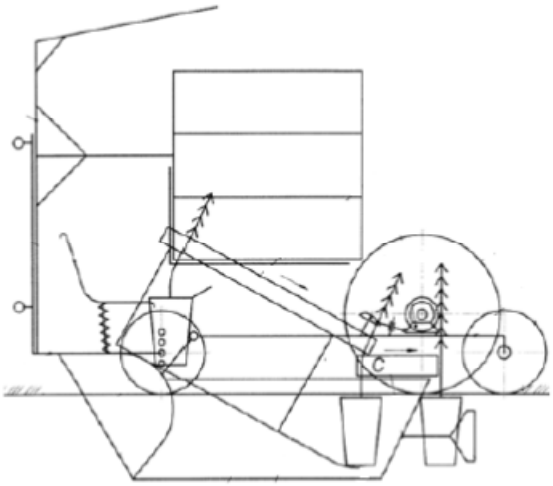


Рисунок 3. Машина для посадки сеянцев и саженцев с закрытой корневой системой патент № 2555009 С2

Figure 3. A machine for planting seedlings and seedlings with a closed root system patent No. 2555009 C2

Источник: Патент на полезную модель [20]

Source: Utility model patent [20]

Машина для посадки сеянцев и саженцев с закрытой корневой системой (Патент № 2555009 С2) (рис. 3) конструктивно более совершенна, механизм подачи – скатная доска и посадочный аппарат в виде ременных передач обеспечивают нулевую скорость саженца относительно почвы.

Однако при работе лесопосадочной машины при перекладке растений из наклонного ременного транспортера в горизонтальный возможно повреждение саженца, кроме того, ременные передачи не обладают постоянным передаточным числом из-за проскальзывания, также ременные передачи склонны к провисанию [21].

Зарубежные образцы современной лесопосадочной техники (например, Risutec MP-160 (Финляндия) (рис. 4), M-Planter (Финляндия) (рРис. 5) или Bracke P11.a (Швеция) (рис. 6)) имеют значительную стоимость и требуют наличия агрегатируемой тяжелой техники (с высокими энергозатратами), такой как экскаватор или харвестер.

Эти машины требуют высоких затрат как при работе, так и при их обслуживании и хранении.

В силу значительных отличий климатических условий на территории Российской Федерации от скандинавских стран (более сухой климат) посадку необходимо проводить в боле сжатые сроки весной и осенью, с учетом огромных площадей, требующих лесовосстановления, применение импортных машин дискретного типа становится нерациональным из-за их низкой производительности (до 300 шт./ч).

Кроме того, подобным машинам сложно обеспечить линейную посадку лесных насаждений, а шахматная посадка значительно затрудняет дальнейший уход за саженцами [12, 14, 22, 23, 24, 25, 26].

В соответствии с предъявляемыми требованиями в Воронежском государственном лесотехническом университете была разработана конструкция универсальной лесопосадочной машины с посадочным аппаратом цепного типа.

Посадочная машина с цепным посадочным аппаратом (рис. 7) состоит из рамы 1, сошника 2, уплотняющих катков 3, цепного посадочного аппарата 4, приводных опорных колес 5, цепной передачи привода посадочного аппарата 6, кресла сажальщика 7 и ящика для посадочного материала 8.

Лесопосадочная машина с цепным посадочным аппаратом высаживает сеянцы в посадочную щель, образуемую сошником при движении сажалки. Сажальщик перемещает сеянец из ящика для посадочного материала в захват цепного посадочного аппарата на его вертикальном участке корнями вниз. Захват переносит саженец на горизонтальный участок в посадочную щель, сохраняя его вертикальное положение, при этом обеспечивается нулевая скорость саженца относительно земли, до его засыпания почвой.

Затем захват открывается и перемещается вверх. Корни растения уплотняются в почве при помощи уплотняющих катков. Шаг посадки можно

регулировать, изменяя количество захватов на цепях посадочного аппарата.

Рисунок 4. Лесопосадочная машина RisutecMP-160

Figure 4. Risutec MP-160 forest planting machine

Источник: Forestry machinery for productive silviculture. URL: https://risutec.fi/ (дата обращения: 18.09.2021).

Source: Forestry machinery for productive silviculture. URL: https://risutec.fi/ (date of access: 18.09.2021)

Цепной посадочный аппарат нового типа (рис. 8) состоит из двух цепей 1, соединенных между собой втулками 2, захватов 3, оси которых расположены во втулках, блока приводных звездочек 4, ведомых звездочек 5, планки открывания захватов 6, успокоителя 7, ответного механизма 8.

В лесопосадочной машине захваты цепного посадочного аппарата выполнены качающимися, для этого ось каждого захвата располагается во втулке, прикрепленной к цепи. Захват будет сохранять горизонтальное положение, при этом саженец будет располагаться вертикально до самого засыпания растения грунтом. Нужная ориентация захвата обеспечивается за счет ответного механизма и ролика, соединенного с осью захвата. Захваты выполнены постоянно закрытыми. Открытие захватов происходит только при помещении сеянца в захват на вертикальном участке и после засыпания грунтом в момент освобождения сеянца в конце цикла посадки.

Рисунок 5. Лесопосадочная машина M-Planter

Figure 5. M-Planter planting machine

Источник: M-Planter-M- Planter Oy. URL: http://www.m-planter.fi/en/M-Planter.html (дата обращения: 18.09.2021)

Source: M-Planter-M- Planter Oy. URL: http://www.m-planter.fi/en/M-Planter.html (date of access: 18.09.2021)

Рисунок 6. Лесопосадочная машина BrackeP11.a

Figure 6. Bracke P11.a planting machine

Источник: Посадочный агрегат Bracke P11.a. URL: http://reforestation.ru/aggregates/p11/ (дата обращения: 18.09.2021).

Source: Posadochnyj agregat Bracke P11.a. URL: http://reforestation.ru/aggregates/p11/ (date of access: 18.09.2021).

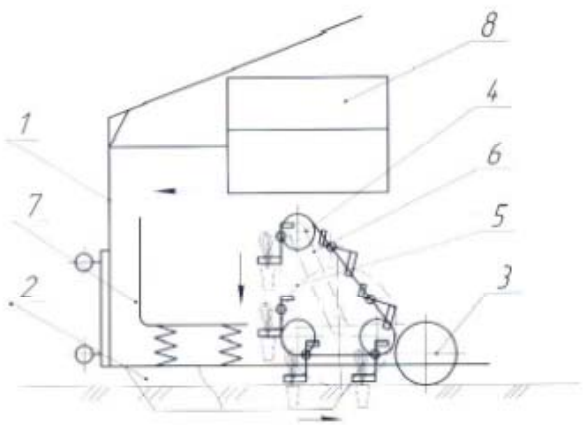


Рисунок 7. Схема лесопосадочной машины с цепным посадочным аппаратом
Figure 7. Diagram of a forest planting machine with a chain planting apparatus
Источник: Собственная схема авторов
Source: Authors' own scheme

Привод посадочного аппарата осуществляется от приводных опорных колес. Защита посадочного аппарата и его привода от перегрузки осуществляется предохранительной муфтой.

Главным достоинством цепного посадочного аппарата является то, что нулевая скорость сеянца относительно земли обеспечивается не в одной точке внизу траектории, как у лучевого посадочного аппарата, а на некотором отрезке, что значительно повышает качество посадки.

Заключение

Разработанные универсальные лесопосадочные машины достаточно просты конструктивно. Большинство узлов и механизмов данных лесопосадочных машин унифицировано с уже выпускаемыми лесопосадочными машинами (например, СЛН-1). Эксплуатация и обслуживание этих машин также не вызовет затруднений, так как новая машина агрегатируется с теми же тракторами, что уже имеются в лесном хозяйстве страны.

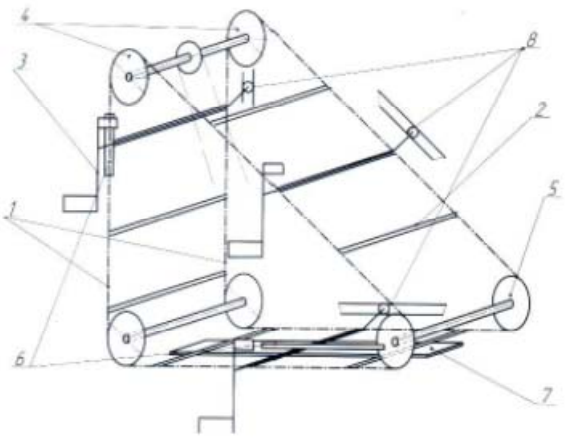


Рисунок 8. Цепной посадочный аппарат нового типа
Figure 8. A new type of chain lander
Источник: Собственная схема авторов
Source: Authors' own scheme

В условиях, когда требуется посадка сеянцев как с открытой, так и с закрытой корневой системой, универсальность данных лесопосадочных машин позволит сократить номенклатуру машин в лесном хозяйстве и уменьшить затраты на их хранение и эксплуатацию.

Список литературы

1. Авдонина А. М. Национальный проект "Экология": робкие шаги к реализации. Экономическое развитие России. 2019. Т. 26. № 5. С. 53-55.

2. Шихов, А. Н., Зарипов А. С. Многолетние тренды потерь лесов от пожаров и ветровалов на северо-востоке Европейской России. Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, 12–16 ноября 2018 года / Институт космических исследований Российской академии наук. Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2018. С. 453.

3. Вертакова, Ю. В., Есенкова Г. А., Евченко А. В. Состояние и приоритеты цифровизации лесного хозяйства России в условиях институциональной трансформации экономики и общества. Повышение эффективности управления устойчивым развитием лесопромышленного комплекса : Материалы Всероссийской

научной конференции, посвященной 90-летию Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова, Воронеж, 15–16 октября 2020 года / Редколлегия: Е.А. Яковлева [и др.]. Воронеж: Издательство "Знание-М", 2020. С. 215-221. DOI 10.38006/907345-73-7.2020.215.221.

4. Пресс-служба Минприроды России / Подведены предварительные итоги пожароопасного сезона 2020 года: 10 субъектов РФ не допустили ни одного лесного пожара. URL: https://www.mnr.gov.ru/press/news/podvedeny_predvaritelnye_itogi_pozharoopasnogo_sezona_2020_goda_10_subektov_rf_ne_dopustili_ni_odnog/ (дата обращения: 18.09.2021).

5. Постановление Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 №312-р «Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». URL: https://docs.cntd.ru/document/573658653 (дата обращения: 18.09.2021.

6. Шварц Е. А., Ярошенко А. Ю., Замолодчиков Д. Г., Шматков Н. М. О новой стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года. Устойчивое лесопользование. 2021. № 1(65). С. 2-6. DOI 10.12345/2308-541X_2021_65_1_2.

7. Мочалов Б. А., Бобушкина С. В. Лесокультурное производство - основа непрерывности лесопользования. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 4 (382). С. 80-96. DOI 10.37482/0536-1036-2021-4-80-96.

8. Федеральный национальный проект «Экология». URL: https://buhguru.com/spravka-info/nats-proekt-ekologiya.html (дата обращения: 18.09.2021).

9. Корчагов С. А., Грибов С. Е., Обрядина О. Ю. Экономическая оценка создания лесных культур различным видом посадочного материала. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2017. № 5 (359). С. 92-102. DOI 10.17238/issn0536-1036.2017.5.92.

10. Оплетаев А. С. Залесов С. В., Жигулин Е. В. Состояние лесных питомников на территории Свердловской области. Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 3-1 (93). С. 77-84. DOI 10.23670/IRJ.2020.93.3.011.

11. Бобушкина С. В., Сеньков А. О., Файзулин Д. Х. Практика выращивания лесного посадочного материала с закрытой корневой системой применительно к тепличным комплексам Архангельской области. Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3. № 4. С. 1-16. DOI 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-16.

12. Ghaffariyan, Mohammad. (2021). A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. Silva Balcanica. 22. 25-32. DOI: 10.3897/silvabalcanica.22.e64233.

13. Manner, J.; Ersson, B.T. Mechanized tree planting in Nordic forestry: Simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. J. For. Sci. 2021, 67, 242–246, doi:10.17221/203/2020-JFS.

14. Проказин Н. Е., Бартенев И. М., Родин С. А. Динамика приживаемости и роста культур сосны обыкновенной на горельнике в лесостепной зоне. Современная лесная наука: проблемы и перспективы : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 20–22 декабря 2017 года. Воронеж: Истоки, 2017. С. 335-338.

15. Ramantswana, M., Guerra, S.P.S., Ersson, B.T. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. CurrForestryRep 6, 143-158 (2020). https://doi.org/10.1007/s40725-020-00114-7

16 Малышева В. И., Чернышов М. П. Выращивание сеянцев сосны обыкновенной с закрытой корневой системой в Воронежской области. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020. Т. 8. № 3 (50). С. 316-321.

17. Бубнов С. С., Малюков С. В., Аксенов А. А. Обзор конструкций лесопосадочных машин для открытых площадей и расчищенных вырубок. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020. Т. 8. № 1 (48). С. 29-34. DOI 10.34220/2308-8877-2020-8-1-29-34.

18. Luoranen, Jaana & Viiri, Heli. (2016). Deep planting decreases risk of drought damage and increases growth of Norway spruce container seedlings. New Forests. 47. 10.1007/s11056-016-9539-3.

19. Zelikov V. A., Kadali B. Raghuram, Stasyuk V. V., Kazachek M. N. Use of fuses of increased accuracy in the drives of rotary forestry machines. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 23 октября 2020 года. Voronezh, 2020. P. 012065. DOI 10.1088/1755-1315/595/1/012065.

20. Патент на полезную модель № 169357 U1 Российская Федерация, МПК A01C 11/02. Машина для посадки сеянцев с закрытой корневой системой : № 2016135813 : заявл. 05.09.2016 : опубл. 15.03.2017 / А. А. Мартынюк, В. И. Казаков, Н. Е. Проказин [и др.] ; заявитель Федеральное бюджетное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФБУ ВНИИЛМ).

21. Патент на полезную модель № 177604 U1 Российская Федерация, МПК A01C 11/02. Лесопосадочная машина для сеянцев с закрытой корневой системой : № 2017118411 : заявл. 26.05.2017 :опубл. 02.03.2018 / А. А. Мартынюк, В. И. Казаков, Н. Е. Проказин [и др.] ; заявитель Федеральное бюджетное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства" (ФБУ ВНИИЛМ).

22. Laine, Tiina. (2017). Mechanized tree planting in Finland and improving its productivity. Dissertationes Forestales. 2017. 10.14214/df.239.

23. Ersson, B.T.; Laine, T.; Saksa, T. Mechanized tree planting in Sweden and Finland: Current state and key factors for future growth. Forests 2018, 9, 370, doi:10.3390/f9070370.

24. Holl, Karen, Brancalion, Pedro. (2020). Tree planting is not a simple solution. Science. 368. 580-581. 10.1126/science.aba8232.

25 Dumroese, R.K.; Balloffet, N.; Crockett, J.W.; Stanturf, J.A.; Nave, L.E. A national approach to leverage the benefits of tree planting on public lands. New For. 2019, 50, 1–9, doi:10.1007/s11056-019-09703-2.

26. Герц Э. Ф., Мехренцев А. В., Побединский В. В. Повышение эффективности мультифункциональных машин для ведения интенсивного лесного хозяйства. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 1 (379). С. 138-149. DOI 10.37482/0536-1036-2021-1-138-149.

References

1. Avdonina A. M. Nacional'nyj proekt "Jekologija": robkie shagi k realizacii. Jekonomicheskoe razvitie Rossii. 2019. Vol. 26. № 5. S. 53-55.

2. Shihov A. N., Zaripov A. S. Mnogoletnie trendy poter' lesov ot pozharov i vetrovalov na severo-vostoke Evropejskoj Rossii. Sbornik tezisov dokladov shestnadcatoj Vserossijskoj otkrytoj konferencii "Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa", Moskva, 12–16 nojabrja 2018 goda / Institut kosmicheskih issledovanij Rossijskoj akademii nauk. Moskva: Institut kosmicheskih issledovanij Rossijskoj akademii nauk, 2018. S. 453.

3. Vertakova Ju. V., Esenkova G. A., Evchenko A. V. Sostojanie i prioritety cifrovizacii lesnogo hozjajstva Rossii v uslovijah institucional'noj transformacii jekonomiki i obshhestva. Povyshenie jeffektivnosti upravlenija ustojchivym razvitiem lesopromyshlennogo kompleksa : Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii, posvjashhennoj 90-letiju Voronezhskogo gosudarstvennogo lesotehnicheskogo universiteta imeni G. F. Morozova, Voronezh, 15–16 oktjabrja 2020 goda / Redkollegija: E.A. Jakovleva [i dr.]. Voronezh: Izdatel'stvo "Znanie-M", 2020. S. 215-221. DOI 10.38006/907345-73-7.2020.215.221.

4. Press-sluzhba Minprirody Rossii / Podvedeny predvaritel'nye itogi pozharoopasnogo sezona 2020 goda: 10 sub#ektov RF ne dopustili ni odnogo lesnogo pozhara. URL: https://www.mnr.gov.ru/press/news/podvedeny_predvaritelnye_itogi_pozharoopasnogo_sezona_2020_goda_10_subektov_rf_ne_dopustili_ni_odnog/ (data obrashhenija: 18.09.2021).

5. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 11.02.2021 №312-r «Strategija razvitija lesnogo kompleksa Rossijskoj Federacii do 2030 goda». URL: https://docs.cntd.ru/document/573658653 (data obrashhenija: 18.09.2021.

6. Shvarc E. A., Jaroshenko A. Ju., Zamolodchikov D. G., Shmatkov N. M. O novoj strategii razvitija lesnogo kompleksa Rossijskoj Federacii do 2030 goda. Ustojchivoe lesopol'zovanie. 2021. № 1 (65). S. 2-6. DOI 10.12345/2308-541X_2021_65_1_2.

7. Mochalov B. A., Bobushkina S. V. Lesokul'turnoe proizvodstvo – osnova nepreryvnosti lesopol'zovanija. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2021. № 4 (382). S. 80-96. DOI 10.37482/0536-1036-2021-4-80-96.

8. Federal'nyj nacional'nyj proekt «Jekologija». URL: https://buhguru.com/spravka-info/nats-proekt-ekologiya.html (data obrashhenija: 18.09.2021).

9. Korchagov S. A., Gribov S. E., Obrjadina O. Ju. Jekonomicheskaja ocenka sozdanija lesnyh kul'tur razlichnym vidom posadochnogo materiala. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2017. № 5 (359). S. 92-102. DOI 10.17238/issn0536-1036.2017.5.92.

10. Opletaev A. S. Zalesov S. V., Zhigulin E. V. Sostojanie lesnyh pitomnikov na territorii Sverdlovskoj oblasti. Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2020. № 3-1(93). S. 77-84. DOI 10.23670/IRJ.2020.93.3.011.

11. Bobushkina S. V., Sen'kov A. O., Fajzulin D. H. Praktika vyrashhivanija lesnogo posadochnogo materiala s zakrytoj kornevoj sistemoj primenitel'no k teplichnym kompleksam Arhangel'skoj oblasti. Voprosy lesnoj nauki. 2020. Vol. 3. № 4. S. 1-16. DOI 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-16.

12. Ghaffariyan, Mohammad. (2021). A short review on studies on work productivity of mechanical tree planting. Silva Balcanica. 22. 25-32. 10.3897/silvabalcanica.22.e64233.

13. Manner, J.; Ersson, B.T. Mechanized tree planting in Nordic forestry: Simulating a machine concept for continuously advancing site preparation and planting. J. For. Sci. 2021, 67, 242–246, doi:10.17221/203/2020-JFS.

14. Prokazin N. E., Bartenev I. M., Rodin S. A. Dinamika prizhivaemosti i rosta kul'tur sosny obyknovennoj na gorel'nike v lesostepnoj zone. Sovremennaja lesnaja nauka: problemy i perspektivy : Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Voronezh, 20–22 dekabrja 2017 goda. Voronezh: Istoki, 2017. S. 335-338.

15. Ramantswana, M., Guerra, S.P.S.,Ersson, B.T. Advances in the Mechanization of Regenerating Plantation Forests: a Review. CurrForestryRep 6, 143-158 (2020). https://doi.org/10.1007/s40725-020-00114-7

16 Malysheva V. I., Chernyshov M. P. Vyrashhivanie sejancev sosny obyknovennoj s zakrytoj kornevoj sistemoj v Voronezhskoj oblasti. Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika. 2020. Vol. 8. № 3(50). S. 316-321.

17. Bubnov S. S., Maljukov S. V., Aksenov A. A. Obzor konstrukcij lesoposadochnyh mashin dlja otkrytyh ploshhadej i raschishhennyh vyrubok. Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i prak-tika. 2020. Vol. 8. № 1(48). S. 29-34. DOI 10.34220/2308-8877-2020-8-1-29-34.

18. Luoranen, Jaana & Viiri, Heli. (2016). Deep planting decreases risk of drought damage and increases growth of Norway spruce container seedlings. New Forests. 47. 10.1007/s11056-016-9539-3.

19. Zelikov V. A., Kadali B. Raghuram, Stasyuk V. V., Kazachek M. N. Use of fuses of increased accuracy in the drives of rotary forestry machines. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 23 октября 2020 года. – Voronezh, 2020. – P. 012065. – DOI 10.1088/1755-1315/595/1/012065.

20. Patent na poleznuju model' № 169357 U1 Rossijskaja Federacija, MPK A01C 11/02. Mashina dlja posadki sejancev s zakrytoj kornevoj sistemoj : № 2016135813 : zajavl. 05.09.2016 : opubl. 15.03.2017 / A. A. Mar-tynjuk, V. I. Kazakov, N. E. Prokazin [i dr.] ; zajavitel' Federal'noe bjudzhetnoe uchrezhdenie "Vserossij-skij nauchno-issledovatel'skij institut lesovodstva i mehanizacii lesnogo hozjajstva (FBU VNIILM).

21. Patent na poleznuju model' № 177604 U1 Rossijskaja Federacija, MPK A01C 11/02. Lesoposa-dochnaja mashina dlja sejancev s zakrytoj kornevoj sistemoj : № 2017118411 : zajavl. 26.05.2017 :opubl. 02.03.2018 / A. A. Martynjuk, V. I. Kazakov, N. E. Prokazin [i dr.] ; zajavitel' Federal'noe bjudzhetnoe uchrezhdenie "Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut lesovodstva i mehanizacii lesnogo ho-zjajstva" (FBU VNIILM).

22 Laine, Tiina. (2017). Mechanized tree planting in Finland and improving its productivity. Dissertationes Forestales. 2017. 10.14214/df.239.

23. Ersson, B.T.; Laine, T.; Saksa, T. Mechanized tree planting in Sweden and Finland: Current state and key factors for future growth. Forests 2018, 9, 370, doi:10.3390/f9070370.

24. Holl, Karen, Brancalion, Pedro. (2020). Tree planting is not a simple solution. Science. 368. 580-581. 10.1126/science.aba8232.

25. Dumroese, R.K.; Balloffet, N.; Crockett, J.W.; Stanturf, J.A.; Nave, L.E. A national approach to leverage the benefits of tree planting on public lands. New For. 2019, 50, 1–9, doi:10.1007/s11056-019-09703-2.

26. Gerc Je. F., Mehrencev A. V., Pobedinskij V. V. Povyshenie jeffektivnosti mul'tifunkcional'nyh mashin dlja vedenija intensivnogo lesnogo hozjajstva. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2021. № 1(379). S. 138-149. DOI 10.37482/0536-1036-2021-1-138-149.

Сведения об авторах

Драпалюк Михаил Валентинович – доктор технических наук, профессор 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/0000-0002-8029-2706, e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Стасюк Владимир Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8689-955X, e-mail: stasiuk.volodya@yandex.ru.

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.

Information about the authors

Mikhail V. Drapalyuk – Dr. Sci. (Engineering), 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/0000-0002-8029-2706, e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Vladimir V. Stasyuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transportation Organization and Traffic Safety, Voronezh State Forestry University 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.

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

✉ – Автор для корреспонденции/Corresponding author

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/11

УДК 630*.377.44

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ СВОЙСТВ КОЛЕСНОГО ФОРВАРДЕРА 8×8

Владислав Е. Клубничкин[1] ✉, vklubnichkin@gmail.com, 0000-0002-1231-8185
Александр Б. Карташов[2], kartashov@bmstu.ru, 0000-0003-0160-6293
Георгий О. Котиев[2], kotievgo@ya.ru, 0000-0001-7884-157X
Денис Ю. Дручинин[3], druchinin.denis@rambler.ru, 0000-0003-2128-2687

[1]*Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, 141005, Российская Федерация*

[2]*ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана», ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, 105005, Российская Федерация*

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

Рассмотрены условия эксплуатации колесных форвардеров. Описаны требования к эффективности тормозной системы, а также методы испытаний рабочей и стояночной тормозной системы колесных лесозаготовительных машин при работе на подъемах и спусках величиной до 50%. Представлены самые тяжелые случаи нагружения тормозной системы с точки зрения удержания форвардера на уклоне. Составлена расчетная схема определения нагрузок в пятне контакта при спуске колесного форвардера. Приведены исходные данные необходимые для расчета тормозной системы машины. Даны результаты расчетов реакций при расположении форвардера на горизонтальной опорной поверхности и расчет реакций в пятне контакта колеса при спуске и подъеме. Представлены технические параметры тормозной системы балансирных мостов NAF TAP 7601 применяемых на разрабатываемой машине. Приведены результаты расчетов тормозных свойств форвардера в снаряженном состоянии и при полной массе на спуске характеризующийся параметрами α = 40% и α = 50% , а также на подъеме α = -50% . Представлены результаты расчетов требуемого тормозного момента на колесах машины, максимально-реализуемый тормозной момент по сцеплению всех колес переднего и заднего мостов машины. Дан коэффициент запаса тормозных механизмов и коэффициент запаса по сцеплению.

Ключевые слова: тормозной механизм, форвардер, спуск, подъем, колесо, пятно контакта, тормозной момент

Благодарности: Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2019-030 от 22 ноября 2019 г.

Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Клубничкин В. Е. Расчет тормозных механизмов колесного форвардера / В. Е. Клубничкин, А. Б. Карташов, Г. О. Котиев, Д. Ю. Дручинин // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 124–138. – *Библиогр.: с. 135–137 (18 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/11.

Поступила: 26.10.2021 ***Принята к публикации***: 24.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

RESEARCH OF BRAKING PROPERTIES OF WHEEL FORWARDER 8×8

Vladislav E. Klubnichkin[1] ✉, vklubnichkin@gmail.com, 0000-0002-1231-8185
Aleksandr B. Kartashov[2], kartashov@bmstu.ru, 0000-0003-0160-6293
Georgiy O. Kotiev[2], kotievgo@ya.ru, 0000-0001-7884-157X
Denis Yu. Druchinin[3], druchinin.denis@rambler.ru, 0000-0003-2128-2687

[1] *Mytishchi branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 141005, 1st Institutskaya street, 1, Mytishchi, Russian Federation*

[2] *Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State Technical University named after N.E. Bauman,105005, 5 2nd Baumanskaya street, bldg. 1, Moscow, Russian Federation*

[3] *FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, 8 Timiryazeva street, Voronezh, Russian Federation*

Abstract

The operating conditions of wheeled forwarders have been considered. The requirements for the efficiency of the braking system are described, as well as methods for testing the working and parking braking systems of wheeled forestry machines when operating on ups and downs of up to 50%. The most severe brake loading situations in terms of keeping the forwarder on a slope have been shown. A calculation scheme for determining the loads in the contact patch during the descent of a wheeled forwarder has been drawn up. The initial data necessary for calculating the braking system of the machine have been given. The results of calculations of reactions when the forwarder is located on a horizontal support surface and the calculation of reactions in the contact patch of the wheel during descent and ascent are given. The technical parameters of the braking system of the NAF TAP 7601 balancer axles used on the developed machine have been presented. The results of calculations of the braking properties of the forwarder in running order and at full weight on the descent (characterized by the parameters α = 40% and α = 50%, as well as on the ascent α = -50%) have been presented. The results of calculations of the required braking torque on the wheels of the machine, the maximum-realized braking torque for the adhesion of all wheels of the front and rear axles of the machine have been presented. The safety factor of braking mechanisms and the safety factor for adhesion have been given.

Keywords: brake mechanism, forwarder, descent, ascent, wheel, contact patch, braking torque

Acknowledgments: The work was carried out at the Bauman Moscow State Technical University with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-11-2019-030 dated November 22, 2019.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

***For citation*:** Klubnichkin V.E., Kartashov A.B., Kotiev G.O., Druchinin D.Yu (2021) Calculation of the braking mechanisms of a wheeled forwarder. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 124-138 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/11.

Received: 26.10.2021 ***Revised:*** 16.12.2021 ***Accepted***: 24.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

В лесной промышленности технический прогресс зависит от прогрессивности технологических процессов, технического уровня лесозаготовительных машин, а также эффективности их работы. На долю оборудования и инструмента в лесной промышленности приходится более половины капиталовложений.

Российские и зарубежные исследователи отмечают актуальность внедрения технологических процессов заготовки древесины, основанных на применении специализированных колесных лесозаготовительных машин. С каждым годом лесопромышленные предприятия Российской Федерации отдают все больше предпочтения Скандинавской технологии заготовки древесины, при которой используется комплекс машин, включающий в себя харвестр и форвардер на колесном движителе. Данные машины ориентированы на заготовку круглого древесного сырья в виде сортиментов с последующей их трелевкой по лесосеке в полностью погруженном состоянии. Основные требования, предъявляемые к колесным форвардерам – это высокие рабочие скорости движения, хорошая проходимость, комфортные условия труда оператора, безопасность при работе, обеспечиваемая эффективной тормозной системой [1, 2, 3, 4].

Условия, в которых эксплуатируются форвардеры весьма разнообразны. Они характеризуются пересеченным рельефом местности, слабонесущими грунтами, встречающимися единичными неровностями (пни, камни, валежник), крутыми подъемами и спусками и т.д. [5, 6]. При этом в данных условиях оператору форвардера необходимо выполнять технологические операции погрузки и разгрузки сортиментов с частыми остановками машины [7].

В работе проводится исследование по определению нагрузок в пятне контакта колес, расчет тормозных механизмов шарнирно-сочлененного форвардера колесной формулой 8х8 для различных условий (горизонтальное положение, спуск и подъем) [8].

Технические требования к рабочей и стояночной тормозным системам лесозаготовительных машин должны соответствовать требованиям ГОСТ ISO 11169-2011 [9].

Согласно ГОСТ ISO 11169-2011 «Тракторы лесопромышленные и лесохозяйственные колесные, машины лесозаготовительные и лесохозяйственные колесные. Требования к эффективности и методы испытаний тормозных систем» рабочая и стояночная тормозные системы должны удерживать неподвижно машину при переднем и заднем ее положении на уклоне 40% [10, 11, 12].

Самым тяжелым с точки зрения удержания форвардера будет случай спуска с уклона, поскольку в этом случае возникают большие значения нормальных реакций в колесах, по сравнению со случаем подъема [13, 14, 15]. Его расчетная схема представлена на рисунке 2.

Материалы и методы

Расчет статических реакций по осям

Выполнен расчет статических реакций при горизонтальном положении, подъеме и спуске форвардера при снаряженной и полной массе.

Исходные данные для расчета представлены в таблице 1.

При расчетах были приняты допущения о том, что жесткость подвески каждой из осей одинакова, контакт колеса с опорной поверхностью точечный, реакция от задней тележки приложена к опорному основанию, линия ее действия проходит через ось вращения балансира.

Расчет реакций при расположении форвардера на горизонтальной опорной поверхности

Расчетная схема определения нагрузок в пятне контакта при горизонтальном положении форвардера представлена на рисунке 1. Начало координат принято в центре переднего балансира.

Реакция на переднем балансире:

$$R_{z1} = \frac{M \cdot g \cdot (l_4 - l_c)}{l_4} \quad (1)$$

Реакция под передним колесом:

$$R_{z11} = \frac{R_{z1}}{4} \quad (2)$$

Реакция на заднем балансире:

$$R_{z2} = M \cdot g - R_{z1} \quad (3)$$

Реакция под задним колесом:

$$R_{z21} = \frac{R_{z2}}{4} \quad (4)$$

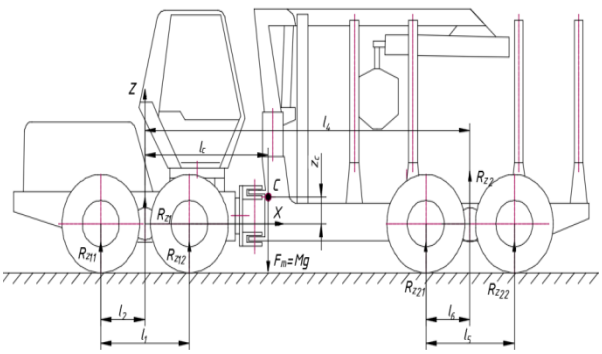


Рисунок 1. Расчетная схема определения нагрузок в пятне контакта при горизонтальном положении форвардера

Figure 1. Calculation scheme for determining the loads in the contact spot at the horizontal position of the forwarder

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Полученные результаты расчета отражены в табл. 2.

Расчет реакций в пятне контакта колеса при спуске и подъеме

Расчетная схема определения нагрузок в пятне контакта при спуске форвардера представлена на рис. 2. Расчетная схема определения нагрузок в пятне контакта при подъеме форвардера представлена на рис. 3. Начало координат принято в центре переднего балансира. При расчете параметров при спуске принимается положительное значение угла α, при подъеме – отрицательное.

Реакция на переднем балансире:

$$R_{z1} = \frac{M \cdot g \cdot sin(\alpha) \cdot z_c + M \cdot g \cdot cos(\alpha) \cdot (l_4 - l_c)}{l_4} \quad (5)$$

Реакция под передним колесом:

$$R_{z11} = \frac{R_{z1}}{4} \quad (6)$$

Реакция на заднем балансире:

$$R_{z2} = M \cdot g - R_{z1} \quad (7)$$

Реакция под задним колесом:

$$R_{z21} = \frac{R_{z2}}{4} \quad (8)$$

Результаты расчетов отражены в табл. 2. Также в таблицу включены результаты для спуска на уклоне 40 %, необходимые для расчета тормозных свойств.

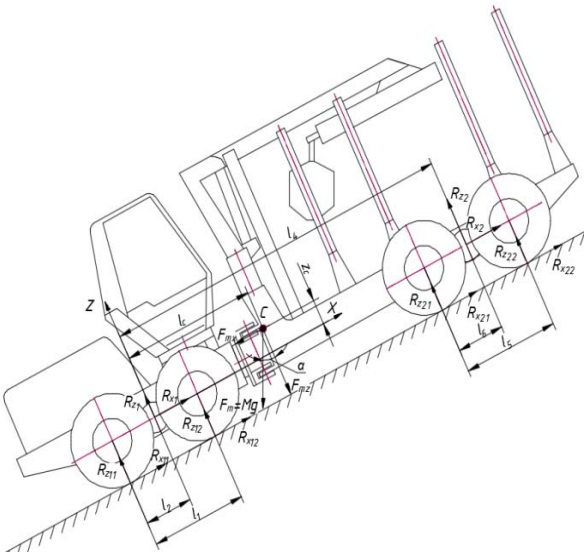


Рисунок 2. Расчетная схема определения нагрузок в пятне контакта при спуске форвардера

Figure 2. Calculation scheme for determining the loads in the contact spot during the descent of the forwarder

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

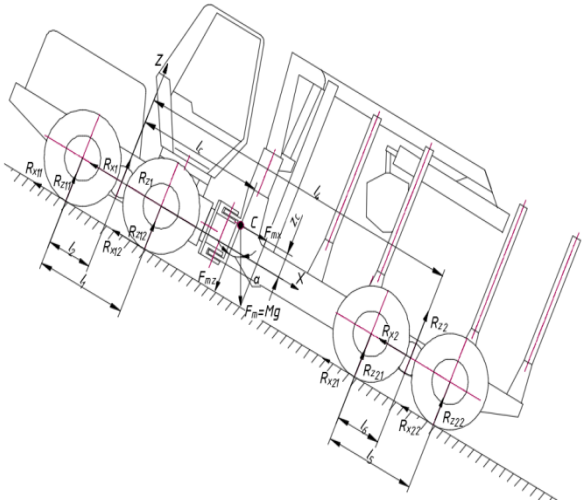


Рисунок 3. Расчетная схема определения нагрузок в пятне контакта при подъеме форвардера

Figure 3. Calculation scheme for determining the loads in the contact spot when lifting the forwarder

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 3

Исходные данные

Table 3

Initial data

Параметр Parameter	Описание Description
Снаряженная масса форвардера, кг Curb weight of forwarder, kg	21 000
Полная масса, кг Gross weight, kg	41000
Максимальный угол преодолеваемого подъема, α, % (°) Maximum angle of ascent to be overcome, α, % (°)	50 (26,565)
Снаряженная масса | Curb weight	
Расстояние вдоль оси X от начала координат до центра тяжести, l_c, мм Distance along the X-axis from the origin to the center of gravity, l_c, mm	2782
Расстояние вдоль оси Z от начала координат до центра тяжести, Z_c, мм Distance along the Z axis from the origin to the center of gravity, Z_c, mm	539
Полная масса | Gross weight	
Расстояние вдоль оси X от начала координат до центра тяжести, l_c, мм Distance along the X-axis from the origin to the center of gravity, l_c, mm	4234
Расстояние вдоль оси Z от начала координат до центра тяжести, Z_c, мм Distance along the Z axis from the origin to the center of gravity, Z_c, mm	1452

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 2

Результаты расчетов нормальных реакций форвардера

Table 2

Results of calculations of normal reactions of the forwarder

Параметр Parameter	Гориз. положе-ние Horiz. position	Спуск α = 40% Descent	Спуск α = 50% Descent	Подъем α = 50% Lift
Снаряженная масса | Curb weight				
Нормальная реакция на переднем балансире, кН Normal reaction on the front balancer, kN	113,53	98,76	93,54	109,55
Нормальная реакция на переднем колесе, кН Normal reaction on the front wheel, kN	28,38	24,69	23,385	27,388
Нормальная реакция на заднем балансире, кН Normal reaction on the rear balance beam, kN	92,407	92,45	90,66	74,65
Нормальная реакция на заднем колесе, кН Normal reaction on the rear wheel, kN	23,10	23,11	22,67	18,66
Полная масса | Gross weight				
Нормальная реакция на переднем балансире, кН Normal reaction on the front balancer, kN	127,50	83,41	71,92	156,15
Нормальная реакция на переднем колесе, кН Normal reaction on the front wheel, kN	31,87	20,85	17,98	39,037
Нормальная реакция на заднем балансире, кН Normal reaction on the rear balance beam, kN	274,58	289,91	287,7	203,48
Нормальная реакция на заднем колесе, кН Normal reaction on the rear wheel, kN	68,64	72,48	71,93	50,87

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 3

Технические параметры тормозной системы моста NAF TAP 7601

Table 3

Technical parameters of the brake system of the axle NAF TAP 7601

Рабочая тормозная система | Service brake system	
Тормозной момент фрикционов (дин.), Н·м | Braking torque of the frictions (din.), N·m	3300
Тормозной момент колес (дин.), Н·м | Braking torque of wheels (din.), N·m	60000
Тормозной момент фрикционов (стат.), Н·м | Braking torque of the frictions (stat.), N·m	5000
Тормозной момент колес (стат.), Н·м | Braking torque of wheels (stat.), N·m	90800
Давление, бар | Pressure, bar	80..100
Активная площадь поршня, мм^2 | Active area of the piston, mm^2	1410
Требуемое начальное давление, бар | Required initial pressure, bar	0,5..1,5
Ход, мм | Stroke, mm новые фрикционы | new friction максимальное значение | maximum value	 5-6 11
Стояночная тормозная система | Parking brake system	
Тормозной момент фрикционов (стат.), Н·м | Braking torque of the frictions (stat.), N·m	6200
Тормозной момент колес (стат.), Н·м | Braking torque of wheels (stat.), N·m	112 000
Противодавление, бар | Back pressure, bar	40..80
Активная площадь поршня, мм^2 | Active area of the piston, mm^2	4880
Ход, мм | Stroke, mm новые фрикционы | new friction максимальное значение | maximum value	 5-6 11

Источник: nafaxles.com
Source: nafaxles.com

Таблица 4

Результаты расчетов тормозных свойств форвардера

Table 4

Results of calculations of braking properties of forwarder

Параметр Parameter	Спуск α = 40% Descent	Спуск α = 50% Descent	Подъем α = -50% Lift
Снаряженная масса | Curb weight			
Требуемый суммарный тормозной момент, $T_{торм}$, кН·м Required total braking torque, $T_{торм}$, kN·m	51,02	61,43	-61,43
Коэффициент запаса тормозных механизмов, $k_{торм}$ Brake reserve ratio, $k_{торм}$	3,56	2,96	2,96
Максимальный суммарный момент колес по трению, $T_{сцеп}$, кН·м The maximum total friction torque of the wheels, $T_{сцеп}$, kN·m	70,14	67,57	67,57
Коэффициент запаса по сцеплению, $k_{сцеп}$ The coefficient of the clutch reserve, $k_{сцеп}$	1,37	1,1	1,1
Полная масса | Gross weight			
Требуемый суммарный тормозной момент, $T_{торм}$, кН·м Required total braking torque, $T_{торм}$, kN·m	99,6	119,93	119,93
Коэффициент запаса тормозных механизмов, $k_{торм}$ Brake reserve ratio, $k_{торм}$	1,82	1,514	1,514
Максимальный суммарный момент колес по трению, $T_{сцеп}$, кН·м The maximum total friction torque of the wheels, $T_{сцеп}$, kN·m	136,95	131,93	131,93
Коэффициент запаса по сцеплению, $k_{сцеп}$ The coefficient of the clutch reserve, $k_{сцеп}$	1,37	1,1	1,1

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Максимальная нормальная нагрузка на мост 289,9кН возникает при полной массе при спуске на 40% уклоне, соответствующая нормальная нагрузка на колеса составляет 72,48 кН.

Результаты и обсуждение

Исходные данные для расчета и результаты расчета нормальных реакций Rz отражены в таблице 1 и 2 соответственно. Рассматриваются случаи спуска при угле 40% для удовлетворения требований ГОСТ ISO 11169-2011, а также спуска и подъема при угле 50% для удовлетворения требования Технического задания по преодолению максимального уклона.

Значение требуемого для удержания форвардера суммарного тормозного момента колес определяется по формуле (9):

$$T_{торм} = M \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot r_{ko}, \quad (9)$$

где M – масса форвардера;

α – угол наклона опорного основания;

r_{ko} – статический радиус колеса. Для шины 750/55 B26.5 r_{ko} = 667мм.

Коэффициент запаса тормозных механизмов форвардера определяется по формуле (10):

$$k_{торм} = \left|\frac{2 \cdot T_{торм_моста}}{T_{торм}}\right|, \quad (10)$$

где $T_{торм_моста}$ – суммарный тормозной момент всех колес моста.

На форвардере планируется применять мосты NAF TAP 7601. Технические параметры тормозной системы моста NAF TAP 7601 представлены в таблице 3.

Из таблицы 3 принимаем $T_{торм_моста}$= 90,8 кН·м – тормозной момент рабочего тормоза в статике (заблокированное положение). При выполнении требований ГОСТ ISO 11169-2011 и Технического задания рабочими тормозами, их выполнение стояночным тормозом становится гарантированным, поскольку значение тормозного момента стояночной тормозной системы больше чем рабочей (таблица 3).

Также проводится расчет максимального момента по трению для подтверждения возможности остановки и нахождения форвардера в заданном положении. Максимальный суммарный момент колес по трению:

$$T_{сцеп} = M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \mu \cdot r_{ko}, \quad (11)$$

где μ – коэффициент сцепления. Для твердого сухого опорного основания принимаем μ = 0,55.

Коэффициент запаса по трению определяется по формуле (12):

$$k_{сцеп} = \left|\frac{T_{сцеп}}{T_{торм}}\right|, \quad (12)$$

Полученные результаты расчетов тормозных свойств форвардера представлены в табл. 4.

По полученным результатам видно, что все значения коэффициентов запаса тормозных механизмов и коэффициентов запаса по сцеплению имеют значения > 1. Исходя из этого можно сделать вывод, что имеющиеся тормоза позволяют удовлетворять требования ГОСТ ISO 11169-2011 и Технического задания.

Расчет распределения тормозных моментов по мостам

В данной части проводится расчет распределения тормозных моментов по мостам с целью получения режимов их работы.

Уравнение равновесия относительно продольной оси имеет вид:

$$M \cdot g \cdot \sin(\alpha) = R_{x1} + R_{x2}, \quad (13)$$

где R_{x1}, R_{x2} – суммарные продольные реакции колес, приведенные к оси переднего и заднего моста соответственно.

В случае, когда момента тормозных механизмов моста достаточно для удержания соответствующего моста, значения продольных реакций, возникающих в колесах в статическом положении, разделятся пропорционально нормальным реакциям:

$$R_{x1} = \frac{R_{z1}}{R_{z2}} R_{x2}, \quad (14)$$

Тогда уравнение (13) примет вид:

$$M \cdot g \cdot \sin(\alpha) = \frac{R_{z1}}{R_{z2}} R_{x2} + R_{x2}, \quad (15)$$

Исходя из уравнения (15) находятся значения продольных реакций задней тележки R_{x2}, далее из уравнения (13) определяются значения продольных реакций передней тележки R_{x1}.

Требуемые суммарные тормозные моменты колес тележек определяются по формуле:

$$T_{тормi} = R_{xi} \cdot r_{ko}, \quad (16)$$

где $T_{тормi}$ – суммарный тормозной момент i-ой тележки.

Коэффициент запаса тормозных механизмов моста определяется по формуле:

$$k_{тормi} = \left|\frac{T_{торм_моста}}{T_{тормi}}\right|, \quad (17)$$

Максимальный суммарный момент колес по трению, приведенный к оси моста определятся по формуле:

$$T_{сцепi} = R_{zi} \cdot \mu \cdot r_{ko}, \quad (18)$$

Коэффициент запаса по трению определяется по формуле:

$$k_{сцепi} = \left|\frac{T_{сцепi}}{T_{тормi}}\right|, \quad (19)$$

Полученные результаты расчетов тормозных свойств по осям форвардера представлены в табл. 5.

Исследования результатов расчета тормозных свойств форвардера представлены на рис. 4 в виде диаграммы распределения тормозных моментов по ведущим мостам форвардера. Следует выделить, что в снаряженном состоянии при подъеме в 50% требуемый тормозной момент всех колес переднего моста, приведенный к оси переднего моста $T_{торм1}$ = 36,54 кН·м при этом максимально-реализуемый тормозной момент по сцеплению всех колес переднего моста, приведенных к оси переднего моста $T_{сцеп1}$ = 40,19 кН·м.

На диаграмме (рис. 4) характерно выделяется, что при полной массе форвардера на спуске 40 % и 50 % максимально-реализуемый тормозной момент по сцеплению всех колес заднего моста, приведенных к оси заднего моста составил от 105 – 106 кН·м, а на спуске 50 % требуемый тормозной момент всех колес заднего моста, приведенный к оси заднего моста составил до 96 кН·м.

По полученным результатам видно, что момента тормозных механизмов заднего моста не хватает для удержания ПТМ на 50% уклоне, в этом случае, нереализованная часть продольной реакции воспринимается тормозными механизмами переднего моста. Такое перераспределение позволит удовлетворить требования ГОСТ ISO 11169-2011 и Технического задания.

Было проведено сравнение тормозных свойств с аналогами. Аналоги, соответствующие мировым достижениям были определены на основе патентно-информационных и аналитических исследований. Основные значения показателей аналогов определены на основе изучения проспектов, каталогов зарубежных фирм и экспериментальных данных исследователей [16, 17, 18].

В качестве основных параметров при выборе аналогов приняты масса машины, грузоподъемность, колесная формула, дорожный просвет, база, габаритные размеры, применяемыми шинами 750/55 B26.5 и все аналоги оснащены мостами NAF. Технические характеристики аналогов представлены в табл. 6.

При исследовании тормозных свойств разрабатываемого форвардера был получен коэффициент запаса тормозных механизмов переднего и заднего мостов и проведено его сравнение с тормозными свойствами аналогов (John Deere 1910E и Ponsse Elephant King). Коэффициенты запаса тормозных механизмов переднего и заднего мостов форвардеров для снаряженной и полной массы представлены на рис. 5 (при торможении на спуске α = 50%) и на рис. 6 (при торможении на подъеме α = -50%).

В результате сравнения было получено, что разрабатываемая тормозная система форвардера в целом не уступает импортным аналогам и в рассматриваемых случаях нагружения позволяет обеспечить работоспособность машины.

Выводы

1. Максимальная нормальная нагрузка на мост 289,9кН возникает при полной массе при спуске на 40 % уклоне, соответствующая нормальная нагрузка на колеса составляет 72,48 кН.

2. По полученным результатам видно, что все значения коэффициентов запаса тормозных механизмов и коэффициентов запаса по сцеплению имеют значения > 1. Исходя из этого можно сделать вывод, что имеющиеся тормоза форвардера позволяют удовлетворять требования ГОСТ ISO 11169-2011 и Технического задания.

3. По полученным результатам видно, что момента тормозных механизмов заднего моста не хватает для удержания форвардера на 50 % уклоне, в этом случае, нереализованная часть продольной реакции воспринимается тормозными механизмами переднего моста. Такое перераспределение позволит удовлетворить требования ГОСТ ISO 11169-2011 и Технического задания.

Таблица 5

Результаты расчетов тормозных свойств по осям форвардера

Table 5

The results of calculations of braking properties on the axes of the forwarder

Параметр Parameter	Спуск α = 40% Descent	Спуск α = 50% Descent	Подъем α = -50% Lift
Снаряженная масса | Curb weight			
Требуемый тормозной момент всех колес переднего моста, приведенный к оси переднего моста, $T_{торм1}$, кН·м Required braking torque of all front axle wheels, brought to the front axle axle, $T_{торм1}$,, kN·m	26,35	31,20	36,54
Максимально-реализуемый тормозной момент по сцеплению всех колес переднего моста, приведенных к оси переднего моста $T_{сцеп1}$, кН·м Maximum-realizable braking torque on the coupling of all front axle wheels brought to the axle of the front axle $T_{сцеп1}$, kN·m	36,23	34,32	40,19
Коэффициент запаса тормозных механизмов переднего моста, $k_{торм1}$ Coefficient of reserve of brake mechanisms of the front axle	3,45	2,91	2,48
Коэффициент запаса по сцеплению переднего моста, $k_{сцеп1}$ Coefficient of the reserve on the clutch of the front axle	1,37	1,1	1,1
Требуемый тормозной момент всех колес заднего моста, приведенный к оси заднего моста, $T_{торм2}$, кН·м Required braking torque of all rear axle wheels, driven to the rear axle axle, $T_{торм2}$, kN·m	24,66	30,23	24,89
Максимально-реализуемый тормозной момент по сцеплению всех колес заднего моста, приведенных к оси заднего моста $T_{сцеп1}$, кН·м Maximum-realizable braking torque on the coupling of all rear axle wheels brought to the rear axle axle $T_{сцеп1}$, kN·m	33,91	33,26	27,38
Коэффициент запаса тормозных механизмов заднего моста, $k_{торм2}$ Coefficient of reserve of brake mechanisms of the rear axle	3,68	3,00	3,65
Коэффициент запаса по сцеплению заднего моста, $k_{сцеп2}$ Coefficient of the reserve on the clutch of the rear axle	1,37	1,1	1,1
Полная масса | Gross weight			
Требуемый тормозной момент всех колес переднего моста, приведенный к оси переднего моста, $T_{торм1}$, кН·м Required braking torque of all front axle wheels, brought to the front axle axle, $T_{торм1}$,, kN·m	22,25	23,99	52,07
Максимально-реализуемый тормозной момент по сцеплению всех колес переднего моста, приведенных к оси переднего моста $T_{сцеп1}$, кН·м Maximum-realizable braking torque on the coupling of all front axle wheels brought to the axle of the front axle $T_{сцеп1}$, kN·m	30,60	26,39	57,28
Коэффициент запаса тормозных механизмов переднего моста, $k_{тормi}$ Coefficient of reserve of brake mechanisms of the front axle	4,08	3,78	1,74
Коэффициент запаса по сцеплению переднего моста, $k_{сцеп}$ Coefficient of the reserve on the clutch of the front axle	1,37	1,1	1,1
Требуемый тормозной момент всех колес заднего моста, приведенный к оси заднего моста, $T_{торм2}$, кН·м Required braking torque of all rear axle wheels, driven to the rear axle axle, $T_{торм2}$, kN·m	77,35	95,95	67,86
Максимально-реализуемый тормозной момент по сцеплению всех колес заднего моста, приведенных к оси заднего моста $T_{сцеп1}$, кН·м Maximum-realizable braking torque on the coupling of all rear axle wheels brought to the rear axle axle $T_{сцеп1}$, kN·m	106,35	105,54	74,65
Коэффициент запаса тормозных механизмов заднего моста, $k_{торм}$ Coefficient of reserve of brake mechanisms of the rear axle	1,17	0,95	1,34
Коэффициент запаса по сцеплению заднего моста, $k_{сцеп}$ Coefficient of the reserve on the clutch of the rear axle	1,37	1,1	1,1

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

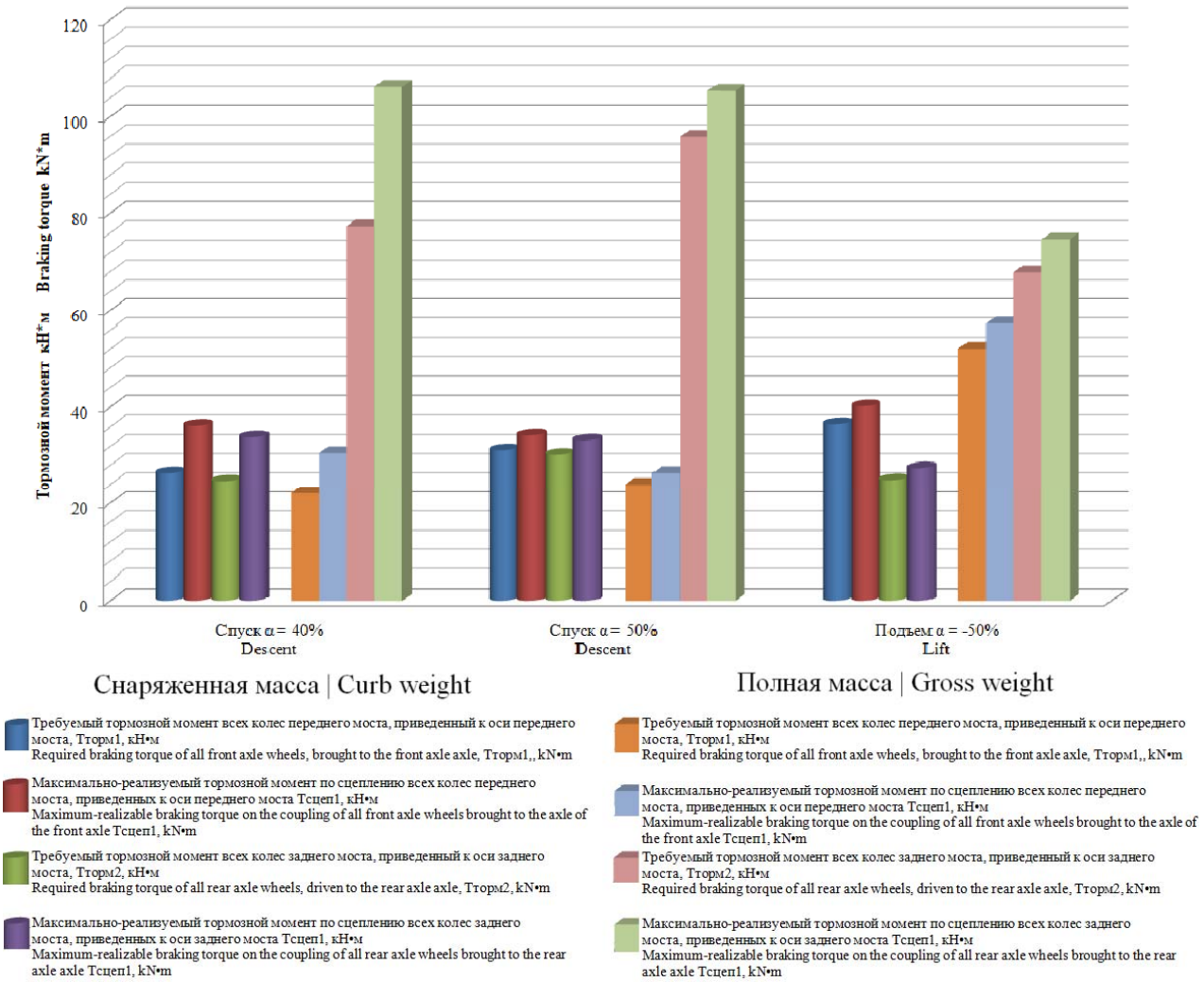


Рисунок 4. Диаграмма распределения тормозных моментов по ведущим мостам форвардера

Figure 4. Distribution of braking moments on the drive axles of the forwarder

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Таблица 6

Технические характеристики аналогов

Table 6

Technical characteristics of analogues

Наименование показателя, единица измерения Name of the indicator, unit of measurement	Разрабатываемый форвардер Development forwarder	John Deere 1910E	Ponsse Elephant King
Колесная формула | Wheel formula	8x8	8x8	8x8
Грузоподъемность, кг | Load capacity, kg	19000	19000	20000
Дорожный просвет, мм | Ground clearance, mm	730	755	800
База, мм | Base, mm	6200	5600	5600
Габаритные размеры, м, длина х ширина х высота Overall dimensions, m, length x width x height	11x3,8x4	11,27x3,8x3,7	11x3,2x3,9
Масса машины, кг | Machine weight, kg	21000	21800	23700
Шины | Tires	750/55B26.5		

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

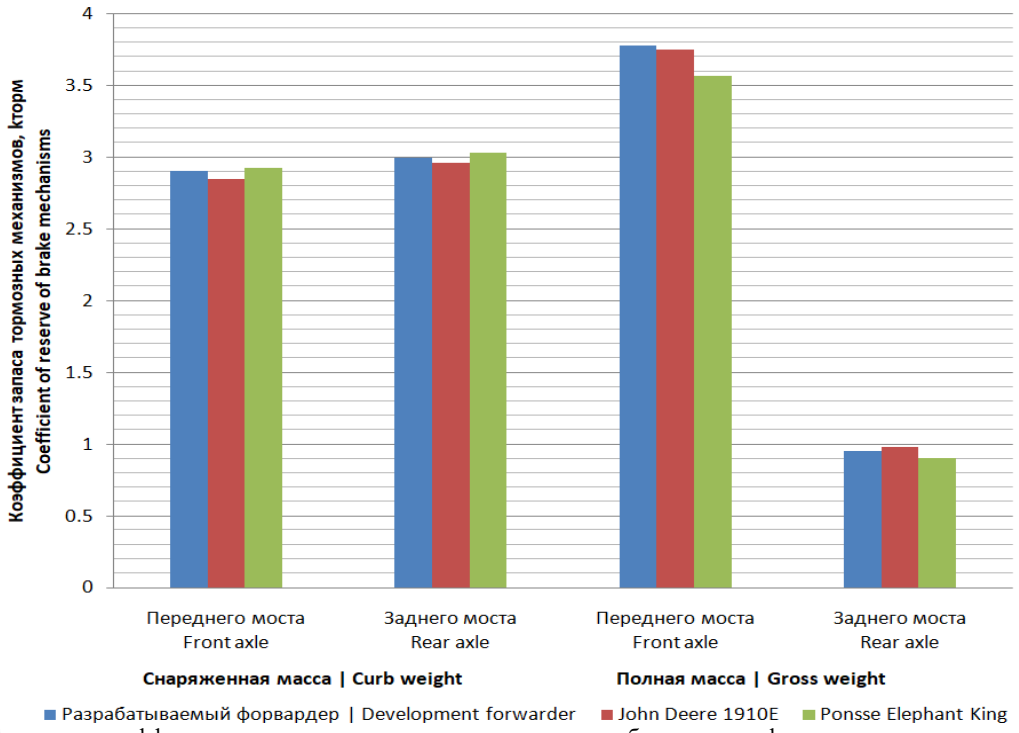


Рисунок 5. Сравнение коэффициента запаса тормозных механизмов разрабатываемого форвардера с аналогами (спуск 50%)

Figure 5. Comparison of the reserve coefficient of the brake mechanisms of development forwarder with analogues (descent 50%)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

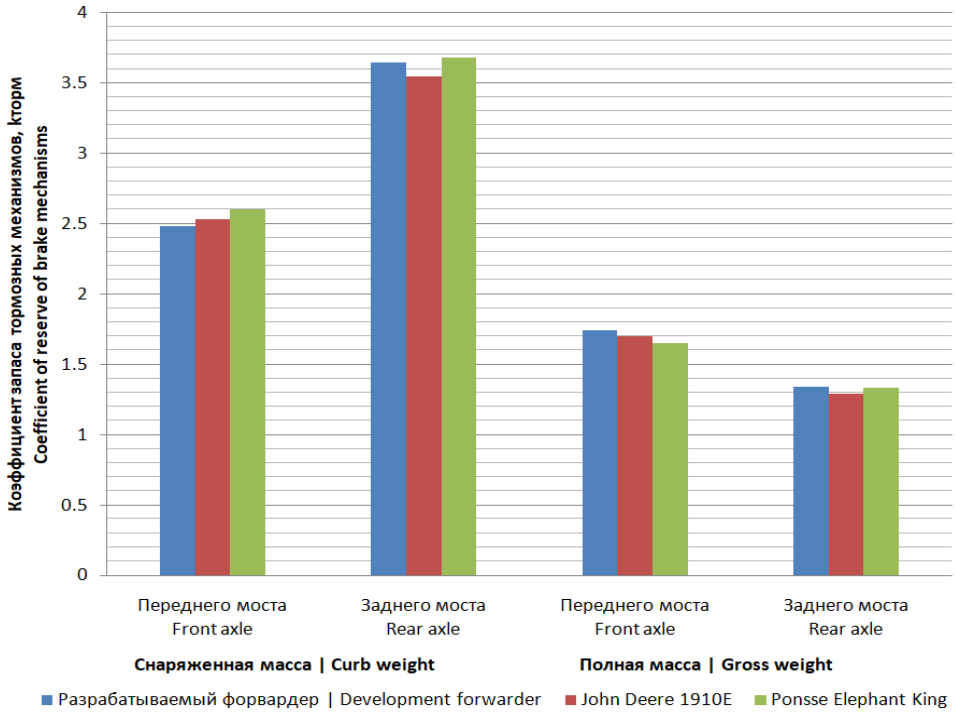


Рисунок 6. Сравнение коэффициента запаса тормозных механизмов разрабатываемого форвардера с аналогами (подъем 50%)

Figure 6. Comparison of the reserve coefficient of the brake mechanisms of development forwarder with analogues (rise 50%)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Список литературы

1. Клубничкин В. Е., Клубничкин Е. Е., Карташов А. Б. Краткий анализ тенденций развития лесозаготовительных машин. Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020; № 3(130): 93–102. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46444923

2. Lindroos O., La Hera P., Häggström C. Drivers of advances in mechanized timber harvesting – a selective review of technological innovation. Croatian Journal of Forest Engineering. 2017; №38(2): 243–258.

3. Labelle E. R., Jaeger D. Effects of Steel Flexible Tracks on Forwarder Peak Load Distribution: Results from a Prototype Load Test Platform. Croatian Journal of Forest Engineering. 2019; №40(1): 1 – 23.

4. Poje A., Grigolato S., Potočnik I. Operator Exposure to Noise and Whole-Body Vibration in a Fully Mechanised CTL Forest Harvesting System in Karst Terrain. Croatian Journal of Forest Engineering. 2019; №40(1): 139 – 150.

5. Proto A. R., Macrì G., Visser R., Harrill H., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity. European Journal of Forest Research. 2018; 137, 2: 143–151. DOI: http://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6

6. Moskalik T., Borz S. A., Dvorak J., Ferencik M., Glushkov S., Muiste P., Lazdins A., Styranivsky O. Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: A Review. Croatian Journal of Forest Engineering. 2017; №38(2): 231–241.

7. Borz S. A., Rommel D., Ziesak M, Vasiliauskas G. Operational requirements and preferences towards forwarding technology. Bulletin of the Transilvania University of Braşov – Series II: Forestry – Wood industry – Agricultural Food Engineering. 2019; №12(61)1: 1–12. DOI: http://doi.org/10.31926/ but.fwiafe.2019.12.61.1.1

8. Клубничкин В. Е., Клубничкин Е. Е., Горбунов А. Ю., Дручинин Д. Ю. Разработка узла сочленения лесной погрузочно-транспортной машины. Лесотехнический журнал. 2020; Т. 10. № 4(40): 217-226. DOI http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/18

9. ГОСТ ISO 11169-2011. Тракторы лесопромышленные и лесохозяйственные колесные, машины лесозаготовительные и лесохозяйственные колесные. Требования к эффективности и методы испытаний тормозных систем: издание официальное: дата введения 2013.01.01. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 10 с.

10. Лоренц А. С., Вашуткин А. С. Конструкция и работа экспериментальной установки, предназначенной для исследования работы тормозных механизмов колесных лесных машин. Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы Международной научно-технической конференции. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2018; 100-102.

11. Мясищев Д. Г., Горбатов С. П., Вашуткин А. С., Лоренц А. С. Прогнозирование ресурса вновь проектируемых тормозных механизмов с учетом инновационных инженерных решений. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021; № 234: 182-197. DOI: http://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.234.182-197

12. Горбатов С. П., Мясищев Д. Г., Вашуткин А. С. Экспериментальное исследование на изнашивание фрикционных пар тормозных механизмов транспортных машин. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020; № 232: 130-141. DOI: http://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.232.130-141

13. Solgi A., Naghdi R., Labelle E. R., Tsioras P. A., Nikooy M. Effect of varying machine ground pressure and traffic frequency on the physical properties of clay loam soils located in mountainous forests. International Journal of Forest Engineering. 2016; №27(3): 161–168. DOI: http://doi.org/10.1080/14942119.2016.1226673

14. Oroumiyeh F., Zhu Y. Brake and tire particles measured from on-road vehicles: Effects of vehicle mass and braking intensity. Atmospheric Environment. 2021; X Vol. 12: 100121. DOI: http://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100121

15. Farwick zum Hagen F. H., Mathissen M., Grabiec T., Hennicke T., Rettig M., Grochowicz J., Vogt R., Benter T. On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions. Atmospheric Environment. 2019; 217: 116943. DOI: http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116943

16. Mologni O., Dyson P., Amishev D., Proto A. R., Zimbalatti G., Cavalli R., Grigolato S. Tensile Force Monitoring on Large Winch-Assist Forwarders Operating in British Columbia. Croatian Journal of Forest Engineering. 2019; №39(2): 193 – 204.

17. Garren A. M., Bolding M. C., Aust W. M., Moura A. C., Barrett S. M. Soil Disturbance Effects from Tethered Forwarding on Steep Slopes in Brazilian Eucalyptus Plantations. Forests. 2019; 10, 721: 1 – 21. DOI: http://doi.org/10.3390/F10090721

18. Holzfeind T., Kanzian C., Stampfer K., Holzleitner F. Assessing Cable Tensile Forces and Machine Tilt of Winch-Assisted Forwarders on Steep Terrain under Real Working Conditions. Croatian Journal of Forest Engineering. 2019; №40(2): 281 – 296. DOI: https://doi.org/10.5552/crojfe.2019.621

References

1. Klubnichkin V. E., Klubnichkin E. E., Kartashov A. B. Kratkiy analiz tendentsiy razvitiya lesozagotovitel'nykh mashin [Brief analysis of trends in the development of logging machines]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva = Proceedings of NSTU im. R.E. Alekseeva. 2020; № 3(130), 93–102. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46444923

2. Lindroos O., La Hera P., Häggström C. Drivers of advances in mechanized timber harvesting – a selective review of technological innovation. Croatian Journal of Forest Engineering. 2017; №38(2): 243–258.

3. Labelle E. R., Jaeger D. Effects of Steel Flexible Tracks on Forwarder Peak Load Distribution: Results from a Prototype Load Test Platform. Croatian Journal of Forest Engineering. 2019; №40(1): 1 – 23.

4. Poje A., Grigolato S., Potočnik I. Operator Exposure to Noise and Whole-Body Vibration in a Fully Mechanised CTL Forest Harvesting System in Karst Terrain. Croatian Journal of Forest Engineering. 2019; №40(1): 139 – 150.

5. Proto A. R., Macrì G., Visser R., Harrill H., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity. European Journal of Forest Research. 2018; 137, 2: 143–151. DOI: http://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6

6. Moskalik T., Borz S. A., Dvorak J., Ferencik M., Glushkov S., Muiste P., Lazdins A., Styranivsky O. Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: A Review. Croatian Journal of Forest Engineering. 2017; №38(2): 231–241.

7. Borz S. A., Rommel D., Ziesak M, Vasiliauskas G. Operational requirements and preferences towards forwarding technology. Bulletin of the Transilvania University of Braşov – Series II: Forestry – Wood industry – Agricultural Food Engineering. 2019; №12(61)1: 1–12. DOI: http://doi.org/10.31926/ but.fwiafe.2019.12.61.1.1

8. Klubnichkin V. E., Klubnichkin E. E., Gorbunov A. Ju., Druchinin D. Ju. Razrabotka uzla sochlenenija lesnoj pogruzochno-transportnoj mashiny [Development of a joint assembly of a forest loading and transport vehicle]. Lesotehnicheskij zhurnal = Forest Engineering journal. 2020; T. 10. № 4(40): 217-226. (In Russ.). DOI http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/18

9. GOST ISO 11169-2011. Traktory lesopromyshlennye i lesohozjajstvennye kolesnye, mashiny lesozagotovitel'nye i lesohozjajstvennye kolesnye. Trebovanija k jeffektivnosti i metody ispytanij tormoznyh sistem: [Forestry and forestry wheeled tractors, logging and forestry wheeled machines. Performance requirements and test methods for brake systems] izdanie oficial'noe: data vvedenija 2013.01.01. – Moskva : Standartinform, 2020. – 10 s.

10. Lorenc A. S., Vashutkin A. S. Konstrukcija i rabota jeksperimental'noj ustanovki, prednaznachennoj dlja issledovanija raboty tormoznyh mehanizmov kolesnyh lesnyh mashin [The design and operation of an experimental installation designed to study the operation of the braking mechanisms of wheeled forest vehicles]. Aktual'nye problemy razvitija lesnogo kompleksa: Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii = Actual problems of the development of the forest complex: Materials of the International Scientific and Technical Conference. – Vologda: Vologodskij gosudarstvennyj universitet, 2018; 100-102.

11. Mjasishhev D. G., Gorbatov S. P., Vashutkin A. S., Lorenc A. S. Prognozirovanie resursa vnov' proektiruemyh tormoznyh mehanizmov s uchetom innovacionnyh inzhenernyh reshenij [Forecasting the resource of newly designed braking mechanisms taking into account innovative engineering solutions.]. Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotehnicheskoj akademii = News of the St. Petersburg Forestry Academy. 2021; № 234: 182-197. DOI: http://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.234.182-197

12. Gorbatov S. P., Mjasishhev D. G., Vashutkin A. S. Jeksperimental'noe issledovanie na iznashivanie frikcionnyh par tormoznyh mehanizmov transportnyh mashin [Experimental study on the wear of friction pairs of braking mechanisms of transport vehicles]. Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotehnicheskoj akademii = News of the St. Petersburg Forestry Academy. 2020; № 232: 130-141. DOI: http://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.232.130-141

13. Solgi A., Naghdi R., Labelle E. R., Tsioras P. A., Nikooy M. Effect of varying machine ground pressure and traffic frequency on the physical properties of clay loam soils located in mountainous forests. International Journal of Forest Engineering. 2016; №27(3): 161–168. DOI: http://doi.org/10.1080/14942119.2016.1226673

14. Oroumiyeh F., Zhu Y. Brake and tire particles measured from on-road vehicles: Effects of vehicle mass and braking intensity. Atmospheric Environment. 2021; X Vol. 12: 100121. DOI: http://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100121

15. Farwick zum Hagen F. H., Mathissen M., Grabiec T., Hennicke T., Rettig M., Grochowicz J., Vogt R., Benter T. On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions. Atmospheric Environment. 2019; 217: 116943. DOI: http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116943

16. Mologni O., Dyson P., Amishev D., Proto A. R., Zimbalatti G., Cavalli R., Grigolato S. Tensile Force Monitoring on Large Winch-Assist Forwarders Operating in British Columbia. Croatian Journal of Forest Engineering. 2019; №39(2): 193 – 204.

17. Garren A. M., Bolding M. C., Aust W. M., Moura A. C., Barrett S. M. Soil Disturbance Effects from Tethered Forwarding on Steep Slopes in Brazilian Eucalyptus Plantations. Forests. 2019; 10, 721: 1 – 21. DOI: http://doi.org/10.3390/F10090721

18. Holzfeind T., Kanzian C., Stampfer K., Holzleitner F. Assessing Cable Tensile Forces and Machine Tilt of Winch-Assisted Forwarders on Steep Terrain under Real Working Conditions. Croatian Journal of Forest Engineering. 2019; №40(2): 281 – 296. DOI: https://doi.org/10.5552/crojfe.2019.621

Сведения об авторах

✉ *Клубничкин Владислав Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1231-8185, e-mail: vklubnichkin@gmail.com.

Карташов Александр Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры колесные машины ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 105005, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0160-6293, e-mail: kartashov@bmstu.ru.

Котиев Георгий Олегович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой колесные машины ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 105005, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7884-157X, e-mail: kotievgo@ya.ru.

Дручинин Денис Юрьевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой 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/0000-0003-2128-2687, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru.

Information about the authors

✉ *Vladislav E. Klubnichkin* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1231-8185, e-mail: vklubnichkin@gmail.com .

Alexander B. Kartashov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya str., 5, p. 1, Moscow, Russian Federation, 105005, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0160-6293, e-mail: kartashov@bmstu.ru.

Georgy O. Kotiev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya str., 5, p. 1, Moscow, Russian Federation, 105005, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7884-157X, e-mail: kotievgo@ya.ru.

Denis Yu. Druchinin – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2128-2687, e-mail: druchinin.denis@rambler.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/12

УДК 676.051.362

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДИСКОВЫХ РУБИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Сергей В. Малюков[1] ✉, malyukovsergey@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2098-154X
Алексей А. Аксенов[1], aaa-aksenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9710-1013
Маргарита А. Малюкова[1], lrita@bk.ru, https://orcid.org/0000-0001-8174-0358

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

В последнее время значительно увеличилась заготовка древесины, вследствие чего на вырубках возросли объемы порубочных остатков, отходы в деревообрабатывающей промышленности также прибавились. Быстрый рост отходов потребовал переработки больших объемов древесной массы и создания новых высокопроизводительных машин, способных измельчить ее в щепу. Обычно щепа используется в качестве топливных гранул, а также для изготовления панелей из ДСП. Операция по измельчению древесины в щепу может производиться во время лесозаготовки или через несколько дней после вырубки деревьев. В данной статье были рассмотрены различные типы дисковых рубительных машин. Они были распределены по отличительным конструктивным признакам. Описаны отличительные особенности машин по производительности, мощности, скорости вращения, числу режущих ножей, габаритам и весу самой машины, а также по виду и размерам перерабатываемой древесины, способам ее подачи в машину и отводу от нее щепы. Показано, что дисковые рубительные машины нашли широкое применение при изготовлении технологической щепы в целлюлозно-бумажной, деревообрабатывающей, лесной и других отраслях промышленности. Проведенный обзор базируется на изучении отечественного и иностранного материала, анализе работы существующих машин различных типов, а также на многочисленных экспериментальных и теоретических исследованиях, выполненных различными авторами. Проведенный нами обзор дисковых рубительных машин будет способствовать более рациональному использованию и модернизации существующего парка рубительных машин и созданию нового экономически выгодного оборудования по измельчению древесины в щепу, отвечающего современному уровню развития техники и данного производства.

Ключевые слова: дисковые рубительные машины, щепа, геликоидальные рубительные машины, древесные порубочные остатки, отходы деревообработки.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Малюков, С. В. Анализ конструкций и режимов работы дисковых рубительных машин / С. В. Малюков, А. А. Аксенов, М. А. Малюкова // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 139–149. – Библиогр.: с. 147–149 (14 назв.). – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/12.

Поступила: 20.10.2021 ***Принята к публикации:*** 11.12.2021 ***Опубликована онлайн:*** 30.12.2021

ANALYSIS OF DESIGNS AND OPERATING MODES OF DISC CHIPPING MACHINES

Sergey V Malyukov[1] ✉, malyukovsergey@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2098-154X
Aleksey A Aksenov[1], aaa-aksenov@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9710-1013
Margarita A Malyukova[1], lrita@bk.ru, https://orcid.org/0000-0001-8174-0358

[1] *FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, 8 Timiryazeva street, Voronezh, Russian Federation*

Abstract

Recently, timber harvesting has increased significantly. As a result of which the volume of felling residues in felling areas and waste in the woodworking industry has also increased. The rapid growth of waste necessitated the processing of large volumes of wood pulp and the creation of new high-performance machines capable of shredding it into chips. Chips are usually used as fuel pellets, as well as for the manufacture of chipboard panels. The operation of chipping wood can be carried out during harvesting or a few days after the trees have been cut down. This article has examined the various types of disc chippers. They were distributed according to distinctive design features. The distinctive features of machines in terms of productivity, power, rotation speed, the number of cutting knives, dimensions and weight of the machine itself, as well as the type and size of the processed wood, the ways of feeding it into the machine and removing chips from it are described. It is shown that disk chippers are widely used in the manufacture of technological chips in the pulp and paper, woodworking, forestry and other industries. The review is based on the study of domestic and foreign material, analysis of the operation of existing machines of various types, as well as on numerous experimental and theoretical studies carried out by various authors. Our review of disc chippers will contribute to a more rational use and modernization of the existing chippers and the creation of new cost-effective equipment for chipping wood into chips, which meets the current level of development of technology and production.

Keywords: disc chippers, wood chips, helicoidal chippers, wood residues, woodworking waste.

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

For citation: Malyukov S.V., Aksenov A.A., Malyukova M.A. (2021) Analysis of designs and operating modes of disk chippers. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 139-149 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222- 7962/2021.4/12.

Received: 20.10.2021 ***Revised***: 01.12.2021 ***Accepted:*** 11.12.2021 ***Published online:*** 30.12.2021

Введение

Для производства технологической щепы из древесины применяются рубительные машины разных типов [1], которые определяют количественные и качественные показатели работы всего комплекса машин технологического потока от распиловки древесного сырья, окорки балансов, их рубки на щепу [2, 3] до сортирования щепы.

В целлюлозно-бумажной промышленности [4] для поперечной распиловки древесины на стволы применяют круглые пилы различных модификаций с общим названием пильные станки, обладающие высокой производительностью. Следующей за распиловкой операцией является окорка. Это необходимо для обеспечения более высокой чистоты и качества продукции и полного использования оборудования, химикатов и других материалов [5]. После окорки основной операцией традиционного метода приготовления древесной щепы является измельчение древесины в рубительных машинах [6].

В условиях целлюлозно-бумажной промышленности в большей мере используются дисковые рубительные машины для получения щепы из древесины.

Всевозможные типы рубительных машин, для удобства анализа и рассмотрения, распределены по отличительным конструктивным признакам. Сущест-

вующие типы рубительных машин нами распределены по следующим основным группам: 1) малоножевые; 2) многоножевые; 3) многоножевые с геликоидальной поверхностью ножей и диска; 4) с горизонтальной подачей древесины; 5) с наклонным и горизонтальным диском; 6) планетарные; 7) для отходов лесопиления и деревообработки; 8) передвижные машины; 9) спиральные машины.

На процесс рубки древесины оказывает влияние большое число факторов, вытекающих из свойств самой древесины и режимов рубки, а также из статической и кинематической геометрии режущего инструмента [7, 8].

Оценка каждой из моделей рубительных машин производится по качеству щепы, расходу энергии на ее получение и по конструктивным признакам машин, определяющим затраты, связанные с ее установкой и эксплуатацией. Энергетическая оценка рубительных машин производится по удельному расходу энергии, т.е. по количеству энергии, расходуемой на единицу объема щепы.

На сравнительную оценку рубительных машин различных типов оказывают существенное влияние их производительность, мощность и тип приводного двигателя, скорость вращения, число режущих ножей, размеры ножевого диска, габарит и вес самой машины [9, 10], а также вид и размеры перерабатываемой древесины, способы ее подачи в машину и отвода от нее щепы.

Материалы и методы

Для анализа эффективности работы дисковых рубительных машин изучено множество научных материалов. В процессе поиска были рассмотрены труды как отечественных, так и зарубежных ученых. Литературный поиск проводился в различных базах данных и включал в себя не только электронные ресурсы (eLIBRARY, КиберЛенинка, Академия Google, Scopus, Web of Science) со следующими запросами: (дисковые рубительные машины) OR (измельчение порубочных остатков) OR (disc chippers) OR (wood chips), но и учебники, учебные пособия, диссертации из фондов научной библиотеки ВГЛТУ и Никитинской библиотеки за период с 1980 по 2020 годы.

Патентный поиск проводили по базам данных ФИПС, Яндекс.Патенты и Lens.org., используя следующую форму запроса ключевых слов: (дисковые рубительные машины) OR (измельчение порубочных остатков) OR (disc chippers) OR (wood chips). Из патентного и систематического поиска были отобраны наиболее релевантные конструкции рубительных машин и проведен статистический анализ степени их сходства и различия по параметрам (количество ножей, сечение загрузочного устройства, габаритные размеры, масса) и режимам работы (мощность, производительность, скорость вращения диска). Оценку степени сходства и различия проводили с использованием иерархической диаграммы сходства, оценивающей удаленность признаков от центра на основании меры квадрата Эвклидова расстояния с помощью пакета прикладных программ (StatSoft Statistica v6.0 Rus).

Результаты и обсуждения

Результаты сравнительного анализа параметров и режимов работы рубительных машин приведены в табл. 1 и 2, а также на рис. 1 и 2.

Таблица 1

Сравнительный анализ параметров конструкций рубительных машин

Table 1

Comparative analysis of chipper design parameters

Машина | Machine	Количество ножей, шт | Number of knives, pcs	Сечение загрузочного устройства, мм | Loading device section, mm	Габаритные размеры (длина, ширина, высота), мм | Overall dimensions (length, width, height), mm	Масса, кг | Weight, kg
FARMI 260 OEM F	3	260 x 320	не указано | not indicated	1100
Urban EM 110	6	800 x 600	446x126x235	1048
ВРМх-350	3	100x100	800x600x700	140
РБ-700-ЛГ-22 | RB-700-LG-22	4	153x137	1571x953x1214	505
ДРМ-3 | DRM-3	4	153x137	1570x1232x1152	505
SKORPION 120E	2	285x165	1750x1300x2170	590
RM-165	2	165x165	1800x1750x2380	480
МРН-10 | MRN-10	16	250x250	2650x1700x1760	4553
МРН-30 | MRN-30	16	250x250	2650x1700x1760	4500

Окончание табл. 1
Continuation of table 1

МРГ-40 | MRG-40	10	580x350	3610x2430x 2145	12000
M1000H	8	360x360	3280x1390x 3540	3200
Yulong T-Rex6550A	6	500x500	не указано | not indicated	5430
МРГ-20Н | MRG-20N	12	не указано | not indicated	2660x1630x 1370	3380
Junkkari HJ 172	4	200x200	2200x1600x 2400	585
Urban TR 70	6	700x400	1000x1790x 1480	210
M200	4	635x635	3220x1670x 2670	900
TP-130 Linddana	2	886x860	2362x1217x 2136	516
Gandini 170 TPS	3	170x170	1850x1250x 1500	550
GreenMech Arbtrak 200	4	200x280	3230x1410x 2612	1600

Источник: открытые данные производителей оборудования [11, 12, 13, 14]

Source: open data from equipment manufacturers [11, 12, 13, 14]

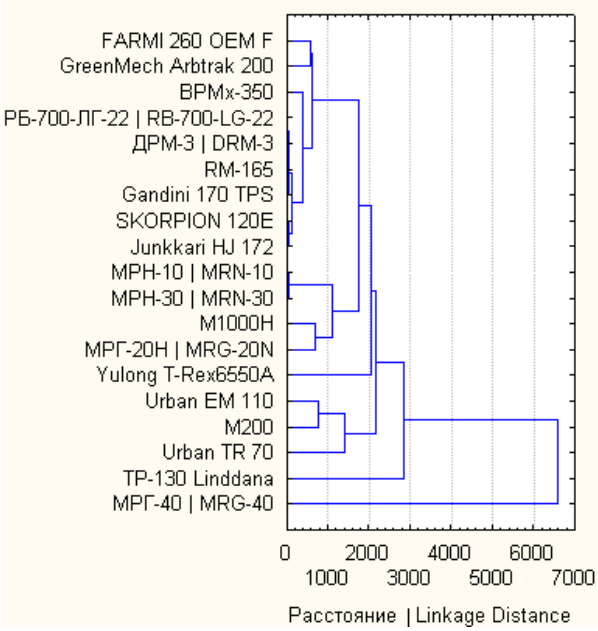


Рисунок 1. Иерархическая диаграмма сходства и различия рубительных машин по конструктивным параметрам

Figure 1. Hierarchical diagram of the similarities and differences of chippers by design parameters

Источник: Собственные вычисления авторов

Source: Authors' own calculations

Таблица 2

Сравнительный анализ режимов работы рубительных машин

Table 2

Comparative analysis of operating modes of chipping machines

Машина | Machine	Установленная мощность, кВт | Installed power, kW	Производительность (по щепе), м^3/ч | Productivity (for chips), m^3 / h	Скорость вращения диска, мин$^{-1}$ | Disk rotation speed, min^{-1}
FARMI 260 OEM F	55	10-40	540 / 1000
Urban EM 110	18,5	10	160
BPMx-350	5,5	2	1000-1500
РБ-700-ЛГ-22 | RB-700-LG-22	22	2,5	1500
ДРМ-3 | DRM-3	22	3	1500
SKORPION 120E	22	12	1500
RM-165	15	3-10	1000
MPH-10 | MRN-10	55	10	590
MPH-30 | MRN-30	90	30	740
МРГ-40 | MRG-40	160	40	585
M1000H	55	9	1500
Yulong T-Rex6550A	75	15-25	не указано | not indicated
МРГ-20Н | MRG-20N	90	20	740
Junkkari HJ 172	30	30	540-1000
Urban TR 70	37	4	540
M200	26	не указано | not indicated	1500
TP-130 Linddana	18-45	10	1000
Gandini 170 TPS	25-50	12	540
GreenMech Arbtrak 200	33	21,7	не указано | not indicated

Источник: открытые данные производителей оборудования

Source: open data from equipment manufacturers

Даграмму (рис. 1) можно разделить на шесть кластеров. В первый кластер входят девять рубительных машин (FARMI 260 OEM F, GreenMech Arbtrak 200, BPMx-350, РБ-700-ЛГ-22, ДРМ-3, RM-

165, Gandini 170 TPS, SKORPION 120E, Junkkari HJ 172), во второй кластер – четыре машины (МРН-10, МРН-30, М1000Н, МРГ-20Н), в третий – одна (Yulong T-Rex6550A), в четвертый – три (Urban EM 110, M200, Urban TR 70), в пятый – одна (TP-130 Linddana), в шестой – одна (МРГ-40). В первый кластер вошли машины, которые имеют все низкие показатели. Во второй кластер включены машины, которые имеют большое число режущих ножей и большую массу при средних значения загрузочного устройства. Машина, входящая в третий кластер, имеет большое загрузочное устройство и вес и среднее количество ножей. В четвертом кластере собраны машины с большим загрузочным устройством, и средними показателями количества ножей и массы. В пятом машина с большим загрузочным устройством, и низкими показателями количества ножей и массы. В шестом – все показатели имеют высокие значения.

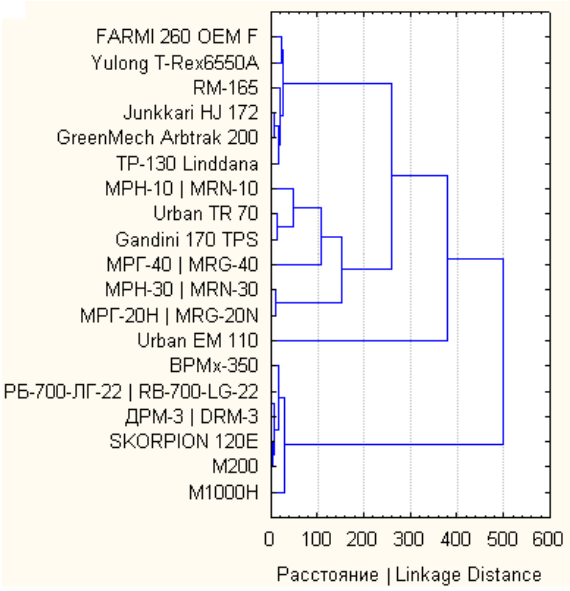


Рисунок 2. Иерархическая диаграмма сходства и различия рубительных машин по режимам работы
Figure 2. Hierarchical diagram of the similarities and differences of chippers by operating mode
Источник: Собственные вычисления авторов
Source: Authors' own calculations

Анализируя диаграмму (рис. 2), можно сказать, что она разделена на четыре кластера. В первый кластер входят шесть рубительных машин (FARMI 260 OEM F, Yulong T-Rex6550A, RM-165, Junkkari HJ 172, GreenMech Arbtrak 200, TP-130 Linddana), во второй кластер – тоже шесть машин (МРН-10, Urban TR 70, Gandini 170 TPS, МРГ-40, МРН-30, МРГ-20Н), в третий – одна машина (Urban EM 110), в четвертый – шесть машин (BPMx-350, РБ-700-ЛГ-22, ДРМ-3, SKORPION 120E, M200, M1000H). В первый кластер вошли машины, которые имеют все средние показатели. Во второй кластер включены машины, которые имеют высокую мощность, среднюю производительность и низкую скорость вращения диска. Машина, входящая в третий кластер, имеет все низкие показатели. В четвертом кластере собраны машины, с высокой скоростью вращения диска и низкими показателями мощности и производительности.

Малоножевые рубительные машины

Для малоножевых рубительных машин (FARMI 260 OEM F, Urban EM 110, BPMx-350, РБ-700-ЛГ-22, ДРМ-3, SKORPION 120E, RM-165) характерно прерывистое резание древесины через определенные промежутки времени. В эти отрезки времени могут происходить повороты и «подпрыгивание» древесины, что отрицательно сказывается на равномерности щепы. Кроме того, прерывистость резания уменьшает производительность малоножевых машин по сравнению с многоножевыми машинами. Общий вид рубильной машины Urban EM 110 показан на рис. 3.

Рисунок 3. Стационарная рубильная машина Urban EM 110 с приводом от электродвигателя
Figure 3. Stationary chipper Urban EM 110 with electric motor drive
Источник: Сайт Rusobalt.ru [11]
Source: website Rusobalt.ru [11]

Скорость вращения диска у машин разных типоразмеров и фирм составляет 150-720 мин$^{-1}$. На лицевой стороне диска в специальных пазах установлены режущие ножи. Обычно ножи смещены от радиального положения на угол 10-15° в сторону вращения. Заточка ножей производится на одну или две фаски с углами 33-44° у одной фаски и углом 19-28° у другой.

Вдоль кромок режущих ножей, в теле диска, имеются сквозные прорези, служащие для прохода щепы после ее отруба. Противоположная от ножа сторона прореза с лицевой стороны диска защищена съемной планкой. У большинства типов машин на ободе диска установлены шесть-восемь лопаток, служащих для разбивания и удаления щепы [1, 3].

При нормальной загрузке и острых ножах малоножевые рубительные машины имеют удельный расход энергии равный 1,9-2,5 кВт ч м$^{-3}$. Мощность холостого хода этих машин составляет 10-14 кВт. По мере затупления ножей процент мелочи в щепе возрастает с 2,5-3 до 6-7,5 % и более.

При малой скорости четырехножевой машины (n = 168 мин$^{-1}$) работа маховых масс почти не используется. Вследствие этого необходимо стремиться к увеличению скорости вращения диска.

При повышении скорости вращения свыше 350-400 мин$^{-1}$ вентиляционные потери энергии от лопастей резко растут. С точки зрения экономии энергии в этом случае выгоднее применять нижний выброс щепы. Применение скорости вращения диска до 600-1000 мин$^{-1}$ позволит резво сократить вес машины и мощность двигателя.

Паузы между резами снижают производительность малоножевых дисковых машин, что невыгодно с точки зрения технико-экономических показателей. Расход металла на изготовление малоножевых машин и занимаемая ими площадь велика по сравнению с многоножевыми. Недостаточное использование кинетической энергии диска требует завышенной мощности двигателя. Все это явилось причиной замены маловожевых дисковых машин более совершенными типами машин.

Многоножевые рубительные машины

Многоножевые машины (МРН-10, МРН-30, МРГ-40, М1000Н, Yulong T-Rex6550A (рис. 4) имеют от 8 до 16 ножей. Число ножей в каждом отдельном случае определяется диаметром стволов, для рубки которых предназначается данная машина.

С целью увеличения махового момента у ряда марок машин имеется маховик, который крепят на валу аналогично диску, одновременно маховик является и тормозным шкивом.

Рисунок 4. Рубильная машина Yulong T-Rex6550A
Figure 4. Yulong T-Rex6550A chipper
Источник: Сайт Made-in-China.com [12]
Source: website Made-in-China.com [12]

Наиболее распространены рубительные машины с углами наклона патрона во всех трех плоскостях. Угол наклона патрона относительно горизонтали составляет 45-52°, что обеспечивает самоподачу баланса к диску машины под действием силы тяжести, так как тангенс угла наклона всегда больше коэффициента трения баланса о стенки патрона. Поворот патрона относительно нормали к диску, особенно при прямоугольной или овальной его форме, обеспечивает скатывание балансов малого диаметра по дну патрона в направлении центра вала. Вследствие этого уменьшается радиус, на котором приложено усилие резания, и уменьшается момент сопротивления, что благоприятно сказывается на энергетическом балансе системы. Кроме того, при скатывании баланса малого диаметра к центру вращения диска дольше сохраняются условия непрерывного реза двумя ножами [2, 6, 10].

Многоножевая машина имеет преимущества с точки зрения более рационального энергетического баланса. Так у четырехножевой машины работа маховых колес составляет 2-10% суммарной работы рубки, а у десятиножевой рубительной машины составляет - 59-83%, что позволяет при равной производительности уменьшить установленную мощность двигателя. Основное преимущество многоножевой рубительной машины по сравнению с малоножевой выявляется при анализе качестве щепы. Непрерывность резания резко повышает производительность машины, что благоприятно сказывается на ее основных технико-экономических показателях: расход металла и занимаемая площадь.

Лучшее использование кинетической знергии маховых масс благоприятно сказывается на конст-

рукции привода; мощность двигателя при этом несколько уменьшается. Более высокие скорости вращения диска (по сравнению с малоножевыми машинами) позволяют производить сооную установку двигателя и машины, что уменьшает габарит и вес установки.

Наряду с преимуществами, дисковые многоножевые рубительные машины имеют и недостатки. К числу таких недостатков следует отнести несоответствие поверхности рубительного диска закону перемещения древесины, затягиваемой ножами. Плоская поверхность диска не обеспечивает необходимого соответствия между скоростью древесины и положенаем конца бревна. В момент резания создается давление, которое изменяет форму отруба, так как рез не проходит по естественной винтовой плоскости. Наличие давления подачи приводит к значительному износу поверхности диска. Другим недостатком многоножевых рубительных машин является форма питающего патрона, имеющего большой угод наклона к горизонтальной плоскости (45-52°). Этот недостаток объясняется подачей древесины к диску под действием силы тяжести.

Геликоидальные рубительные машины

В основном элементы конструкции у таких машин те же, что и у других типов дисковых многоножевых рубительных машин. Поэтому следует остановиться лишь на тех особенностях, которые отличают эти машины от других многоножевых машин, т.е. на форме заточки ножей и конструкции диска.

В геликоидальных рубительных машинах (МРН 10, МРГ-20Н, МРГ-40 (рис. 5)) диск имеет винтовую поверхность между ножами, которая является продолжением задних кромок ножей.

При подаче древесины через патрон вначале под действием собственной тяжести, а затем вследствие затягивающего воздействия ножей при непрерывном резании имеет место сложное движение ножа относительно древесины. При этом кромка ножа вращается в плоскости, параллельной диску, а бревно перемещается к диску при различных углах затягивания.

Рисунок 5. Рубильная машина МРГ-40
Figure 5. Chipping machine MRG-40
Источник: Сайт PROCTАНКИ [13]
Source: website PROSTANKI [13]

В машинах с плоским ножевым диском в момент резания усилие, возникающее между щепой и ножом, уравновешивается реакцией диска на соприкасающуюся с ней поверхностью бревна. В таких машинах при работе создаются огромные удельные давления. Это влечет за собой снижению качества щепы, вследствие смятия торцевой поверхности, а также - к созданию условия для продольного смещения древесины вследствие деформации, контактирующей с диском поверхности бревна. При этом форма отруба изменяется, так как ножи двигаются не по винтовой линии вследствие ее искажения за счет дополнительного продвижения бревна.

Геликоидальные рубительные машины таких недостатков лишены.

Для получения качественной щепы с равномерной длиной частиц и чистым отрубом большую роль играют величины зазоров между режущими ножами и контрножами, правильная заточка и установка ножей, а также их острота [4, 5].

Принциальная схема резания древесины в данном типе дисковой рубительной машины предполагает сопряжение заточных фасок режущих ножей с геликоидальной поверхностью прижимных секторов диска. В связи с этим режущий нож должен иметь временный угол заточки по своей длине, изменяющийся от 34° до 30°. При указанной заточке режущих ножей поверхность среза древесины в процессе отруба соприкасается с геликоидальной поверхностью заточной фаски ножей и прижимных секторов.

При эксплуатации этих машин необходимо тщательно следить за правильностью заточки режущих ножей. Заточка их под одним углом по всей длине режущего ножа нарушает заложенный в машине принцип резания и приводит к ухудшению качества щепы и некоторому увеличению расхода энергии. Геликоидальная поверхность диска и соответствующая заточка ножей создают благоприятные условия для повышения качества щепы.

Дисковая многоножевая рубительная машина с

геликоидальными ножами имеет те же преимущества и недостатки, что и обычные дисковые многоножевые рубительные машины. Отличие этой машины от обычных дисковых многоножевых машин заключается лишь в конструкции диска и заточке ножей. Следует отметить, что указанные преимущества геликоидальной поверхности могут быть использованы только для одной расчетной длина щепы. При изменении длины щепы эти машины будут работать, как и обычные многоножевые рубительные машины. Во избежание этого необходимо менять геликоидальные сектора, что является недостаком данного типа машин. К другим недостаткам следует отнести недостатки конструкции машин с геликоидальной поверхностью, заключающиеся в довольно сложной обработке диска.

Рубительные машины с горизонтальной подачей древесины

Дисковые многоножевые рубительные машины с горизонталъной подачей древесины (МРГ-20Н, МРГ-40, FARMI 260 OEM F) отличаются от ранее рассматриваемых дисковых многоножевых рубительных машин горизонтальным расположением питающего патрона, несколько уменьшенным числом ножей и большей скоростью вращения диска. Упрощенная конструкция питающего патрона позволяет уменьшить расход металла и способствует снижению веса всей установки.

Угол заточки ножей зависит от породы и чистоты подаваемой древесины. Если древесина грязная или в песке, следует работать с ножами, заточенными на менее острый угол [7, 8, 14].

Для машин крупных типоразмеров ножи составляют из отдельных частей по длине. Таким образом, при повреждении режущей кромки нет необходимости перетачивать весь нож. Экономия от внедрения таких ножей составляет около 30% их стоимости. Горизонтальная подача древесины исключает возможность динамических нагрузок (ударов) на диск при падении бревен по желобу, имевших место у обычных многоножевых машин с наклонным питающим патроном. Это одно из преимуществ машин этого типа. К отличительным признакам следует отнести повышение скорости вращения диска, а также уменьшение числа ножей на диске.

Недостатком рубительных машин о горизонтальной подачей древесного материала является необходимость синхронизировать скорость затягивания бревен рубительными ножами со скоростью подающего транспортера. В том случае, если скорость подачи древесины транспортером окажется недостаточной, то это отразится на размере щепы по длине. Иными словами, качество щепы при этом ухудшится. Обычно скорость транспортера принимается выше скорости затягивания щепы ножами на 5-20%. При этом бревно, упираясь торцом в диск, начинает буксовать по транспортеру, что приводит к износу ленты или цепей.

Передвижные рубительные машины

Для измельчения в щепу отходов лесозаготовок в последнее время очень часто применяются передвижные рубительные машины (Junkkari HJ 172 (рис. 6), Urban TR 70, M200, TP-130 Linddana, Gandini 170 TPS, GreenMech Arbtrak 200). Передвижные рубительные машины позволяют измельчать древесные отходы непосредственно возле деревоперерабатывающих станков, выполняя в то же время уборку цеха.

Рисунок 6. Junkkari HJ 172 Измельчитель древесины от трактора с гидравлической подачей
Figure 6. Junkkari HJ 172 Tractor powered wood chipper with hydraulic feed
Источник: Сайт Rusobalt.ru [11]
Source: website Rusobalt.ru [11]

При окоренных отходах лесопиления и деревопереработки щепа, получаемая на дисковых передвижных машинах, имеет хорошие качественные показатели. Эта щепа лишь немного уступает щепе, приготовленной на стационарных рубительных машинах, и может быть применена в целлюлозно-бумажном производстве при изготовлении древесноволокнистых плит. Она также может быть использована на топливо [7, 9].

На предприятиях такие машины используют как утилизаторы по переработке накопленных на территории куч древесины или древесных отходов.

Передвижные рубительные машины имеют малое число режущих ножей и в большинстве своем небольшой вес. Для их привода требуется двигатель небольшой мощности. Они обеспечивают сравнительно высокую производительность.

Эти рубительные машины нашли применения во всем мире. В России применяются передвижные рубительные машины дискового и барабанного типов. Следует отметить, что в целлюлозно-бумажном производстве могут найти применение лишь дисковые передвижные рубительные машины. В лесной промышленности могут быть использованы также и барабанные машины. Использование для привода этих машин тракторных и дизельных двигателей позволяет при отсутствии силовой электросети измельчать древесину в лесных условиях.

Спиральные рубительные машины

Ножи в таких машинах расположены на двух конических дисках по спирали. Процесс резание древесины осуществляется в продольно-поперечном направлении, каковое в чистом виде осуществляется в барабанных рубительных машинах с цепной подачей балансов. Данные машины могут также измельчать горбыли и рейки.

Спиральные рубительные машины целесообразно применять на лесопильных заводах, так как там перерабатываются наиболее прямолинейные бревна, на измельчение которых и рассчитаны эти машины. При рубке искривленных бревен расчетные режимы работы будут нарушены, бревно будет поворачиваться (без принудительной подачи) и качество щепы снизится. Далее следует отметить, что допускаемое лишь поштучное измельчение бревен, в том числе и тонких, может привести к снижению производительности этих машин.

Выводы

Промышленные малоножевые рубительные машины вследствие прерывистого резания древесины не нашли широкого применения

Многоножевые рубительные машины с геликоидальной поверхностью ножей и диска показали наилучшие результаты при измельчении древесины различных пород по удельному расходу энергии, фракционному составу щепы и производительности.

Отходы лесопиления и переработки целесообразно измельчать на многоножевых геликоидальных рубительных машинах. При необходимости измельчения длинных реек и горбылей целесообразно пристроить к этой машине приспособление для горизонтальной подачи реек и механизм прижима.

Для работы на вырубках и деревообрабатывающей промышленности следует рекомендовать малогабаратные передвижные рубительные машины.

В конструкциях многоножевых рубительных машин намечается тенденция к снижению числа режущих ножей с одновременным увеличением скорости вращения ножевого диска.

С увеличением скорости резания улучшается чистота среза, а также увеличивается скорость подачи древесины в питающем патроне, что способствует получению более качественной технологической щепы. Даже при отсутствии непрерывности резания увеличение скорости подачи древесины способствует более правильному ориентированию бревна при движении его в патроне.

Список литературы

1. Фокин С. В., Фомина О. А. К вопросу производства энергетической древесины дисковыми рубительными машинами с различными способами выброса щепы. Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2020. Т. 24. № 2. С. 68-73. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-68-73.

2. Spinelli R., Marchi E. Trends and perspectives in the design of mobile wood chippers. Croatian Journal of Forest Engineering. 2021. Vol. 42. Issue 1, pp. 25-38. DOI: 10.5552/crojfe.2021.787.

3. Laitila J., Prinz R., Sikanen L. Selection of a chipper technology for small-scale operations – a Finnish case. Journal of Forest Science. 2019. Vol. 65. Issue 4, pp. 121-133. DOI: 10.17221/26/2019-JFS.

4. Девятникова Л. А., Доспехова Н. А., Раковская М. И. Комплексный анализ операций переработки круглых лесоматериалов в технологическую щепу на целлюлозно-бумажном комбинате. Resources and Technology. 2017. Т. 14. № 1. С. 45-83. DOI: 10.15393/j2.art.2017.3781.

5. Fokin S., Eskov D., Medvedeva P., Shportko O., Fomina O. On technical means of obtaining wood chips, as a way to increase soil fertility. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 723. Issue 4. 042025. DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042025.

6. Reczulski M. Optimization of cutting speed and clearance angle in the disc chipper. Wood Research. 2021. Vol. 65. Issue 6, pp. 951-962. DOI: 10.37763/WR.1336-4561/65.6.951962.

7. Патент № 194214 Российская Федерация, МПК B02C 18/14 B27L 11/00. Рубительная машина для переработки древесных отходов : № 2019134501 : заявл. 28.10.2019 ; опубл. 03.12.2019 / К. Г. Кашкаров ; заявитель и патентообладатель К. Г. Кашкаров. – 8 с.

8. Pari, L. Influence of chipping system on chipper performance and wood chip particle size obtained from peach prunings / L. Pari, A. Suardi, Del Giudice [et al] // Biomass and Bioenergy. – 2018. – Vol. 112. – pp. 121-127. – DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.01.002

9. Патент № 195168 Российская Федерация, МПК B27L 11/00. Устройство для измельчения порубочных остатков : № 2019121482 : заявл. 09.07.2019 ; опубл. 16.01.2020 / С. В.Фокин, О. А. Фомина ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО " СГАУ имени Вавилова". – 6 с.

10. Civitarese, V. Production of selected short-rotation wood crop species and quality of obtained biomass / V. Civitarese, S. Faugno, R. Picchio [et al] // European Journal of Forest Research. – 2018. – Vol. 137. – Issue 4. – pp. 541-552. – DOI: 10.1007/s10342-018-1122-3

11. Rusobalt.ru. Рубительные машины. – URL: http://rusobalt.ru/ (дата обращения: 04.10.2021).

12. Made-in-China.com. Каталог продуктов. – URL: https://ru.made-in-china.com/co_zhongguoyulong/product_Yulong-T-Rex6550A-Wood-Shredder_rrsnuruig.html (дата обращения: 04.10.2021).

13. PROСТАНКИ. – URL: https://www.prostanki.com/board/item/53647 (дата обращения: 04.10.2021).

14. Ortz.ru. Измельчители веток. – URL: https://ortz.ru/ (дата обращения: 04.10.2021).

References

1. Fokin S.V., Fomina O.A. *K voprosu proizvodstva jenergeticheskoj drevesiny diskovymi rubitel'nymi mashinami s razlichnymi sposobami vybrosa shhepy* [On the issue of energy wood production by disk chippers with various chip ejection methods]. Forestry Bulletin. 2020, Vol. 24, no. 2, pp. 68-73. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-68-73 (In Russian).

2. Spinelli R., Marchi E. Trends and perspectives in the design of mobile wood chippers. Croatian Journal of Forest Engineering, 2021, Vol. 42, Issue 1, pp. 25-38. DOI: 10.5552/crojfe.2021.787

3. Laitila J., Prinz R., Sikanen L. Selection of a chipper technology for small-scale operations – a Finnish case. Journal of Forest Science, 2019, Vol. 65, Issue 4, pp. 121-133. DOI: 10.17221/26/2019-JFS

4. Devyatnikova L.A., Dospekhova N.A., Rakovskaya M.I. *Kompleksnyj analiz operacij pererabotki kruglyh lesomaterialov v tehnologi-cheskuju shhepu na celljulozno-bumazhnom kombinate* [Complex analysis of operations for processing round timber into technological chips at a pulp and paper mill] Resources and Technology. 2017, Vol. 14, no. 1, pp. 45-83. DOI: 10.15393 / j2.art.2017.3781. (In Russian).

5. Fokin S., Eskov D., Medvedeva, Shportko O., Fomina O. On technical means of obtaining wood chips, as a way to increase soil fertility. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, Vol. 723, Issue 4, 042025. DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042025.

6. Reczulski M. Optimization of cutting speed and clearance angle in the disc chipper. Wood Research, 2021, Vol. 65, Issue 6, pp. 951-962. DOI: 10.37763/WR.1336-4561/65.6.951962.

7. Safin R.R., Grigoriev I.V., Grigorieva O.I., Razumov E.Yu. *Tehnologija i mashiny lesovosstanovitel'nyh rabot* [Technology and machines of reforestation work]. Moscow, 2015, 230 p. (In Russian).

8. Pari L., SuardiA., Del Giudice [et al] Influence of chipping system on chipper performance and wood chip particle size obtained from peach prunings. Biomass and Bioenergy, 2018, Vol. 112, pp. 121-127. DOI: 10.1016/j.biombioe.2018.01.002.

9. Lyubov V.K., Lyubova S.V. *Povyshenie jeffektivnosti jenergeticheskogo ispol'zovanija biotopliv* [Increasing the efficiency of energy use of biofuels]. Arkhangelsk, 2017, 533 p. (In Russian).

10. Civitarese, V., Faugno, S., Picchio, R. [et al] Production of selected short-rotation wood crop species and quality of obtained biomass. European Journal of Forest Research, 2018, Vol. 137, Issue 4, pp. 541-552. DOI: 10.1007/s10342-018-1122-3.

11. Rusobalt.ru. *Rubitel'nye mashiny* [Chipping machines]. URL: http://rusobalt.ru/ (date of access: 10.04.2021). (In Russian).

12. *Katalog produktov* [Made-in-China.com. Product catalog]. URL: https://ru.made-in-china.com/co_zhongguoyulong/product_Yulong-T-Rex6550A-Wood-Shredder_rrsnuruig.html (date accessed: 10.04.2021). (In Russian).

13. PROSTANKI. URL: https://www.prostanki.com/board/item/53647 (date of access: 10/04/2021) (In Russian).

14. Ortz.ru. *Izmel'chiteli vetok* [Branch shredders]. URL: https://ortz.ru/ (date of access: 10/04/2021). (In Russian).

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.

Аксенов Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: orcid.org/0000-0002-9710-1013, e-mail: aaa-aksenov@mail.ru.

Малюкова Маргарита Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: orcid.org/0000-0001-8174-0358, e-mail: lrita@bk.ru.

Information about the authors

Sergey V. Malyukov ✉ – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, Russian Federation; 394087, ORCID: http:// orcid.org/0000-0003-2098-154X, e-mail: malyukovsergey@yandex.ru

Alexey A. Aksenov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Production, Repair and Maintenance of Machinery Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, Russian Federation; 394087, ORCID: orcid.org/0000-0002-9710-1013, e-mail: aaa-aksenov@mail.ru.

Margarita A. Malyukova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Production, Repair and Maintenance of Machinery Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev st., 8, Voronezh, Russian Federation; 394087, ORCID: orcid.org/0000-0001-8174-0358, e-mail: lrita@bk.ru.

✉ Для контактов / Corresponding author

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/13

УДК 630.232

ИССЛЕДОВАНИЕ НАБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПОДГОТОВКИ СЕМЕННОГО МАТЕРИАЛА ХВОЙНЫХ ПОРОД ДЛЯ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ

Татьяна П. Новикова[1] ✉, novikova_tp.vglta@mail.ru 0000-0003-1279-3960

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

Предварительные исследования показали необходимость разработки комплексного подхода к проблеме лесовосстановления, который бы учитывал современные тенденции в области экофизиологии, технологии и техники лесного хозяйства, а также эффективность технологических процессов. Для реализации такого подхода на первом этапе был разработан алгоритм лесовосстановления, который состоит из 31 укрупненной технологической операции и 268 реализаций алгоритма. Для дальнейшего детального изучения технологических операций и разработки математической модели, направленной на нахождение оптимального набора операций для лесовосстановления, была произведена декомпозиция алгоритма. Было выделено 6 групп, каждую из которых целесообразно рассматривать отдельно. В работе рассмотрен 10-й оператор III группы и V-я группа – разработаны алгоритм подготовки семян и алгоритм сепарирования семян. Построены матрицы реализации алгоритмов –13×16-мерная матрица подготовки лесных семян и 14×35-мерная матрица сепарации лесных семян, содержащие бинарные значения. Для исследования операторов алгоритмов на схожесть использовали визуализированную матрицу близости, основанную на квадрате Евклидова расстояния и Ward-методе. В результате обработки данных определены операторы алгоритма, достаточно далеко удаленные от центра групп, которые можно не учитывать в дальнейшем при разработке оптимизационной математической модели процесса лесовосстановления.

Ключевые слова: лесовосстановление, производство лесных семян, набор технологических операций, алгоритм, декомпозиция

Благодарности: Автор благодарит рецензентов и редактора за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Новикова Т. П. Исследование набора технологических операций подготовки семенного материала хвойных пород для лесовосстановления / Т. П. Новикова // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 150–160. – *Библиогр.: с. 158–160 (19 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/13.

Поступила: 10.11.2021 ***Принята к публикации***: 17.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

STUDY OF A SET OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS FOR THE PREPARATION OF CONIFEROUS SEED MATERIAL FOR REFORESTATION

Tatyana P. Novikova[1] ✉, novikova_tp.vglta@mail.ru 0000-0003-1279-3960

[1] *FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, 8 Timiryazeva street, Voronezh, Russian Federation*

Abstract

Preliminary studies have shown the need to develop an integrated approach to the problem of reforestation, which would take into account current trends in the field of ecophysiology, technology and technology of forestry, as well as the efficiency of technological processes. At the first stage, a reforestation algorithm was developed to implement this approach. The algorithm consists of 31 enlarged technological operations and 268 implementations of the algorithm. The algorithm was decomposed for further detailed study of technological operations and the development of a mathematical model aimed at finding the optimal set of operations for reforestation. Six groups were identified, each of which should be considered separately. The work considers the 10th operator of the III-th and V-th groups. An algorithm for preparing seeds and an algorithm for separating seeds have been developed. The matrices for the implementation of the algorithms were constructed (a 13 × 16-dimensional matrix for the preparation of forest seeds and a 14×35-dimensional matrix for the separation of forest seeds, containing binary values). A visualized proximity matrix based on the squared Euclidean distance and the Ward method was used to study the operators of algorithms for similarity. As a result of data processing, the operators of the algorithm are determined, which are far enough from the center of the groups, which can be ignored in the future when developing an optimization mathematical model of the reforestation process.

Keywords: reforestation, production of forest seeds, set of technological operations, algorithm, decomposition

Acknowledgments: The author thanks the reviewers and editors for their contribution to the peer review of this work.

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

***For citation*:** Novikova T.P. (2021) Investigation of a technological operations set for the preparation of coniferous seed material for reforestation. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 150-160 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/13.

Received: 10.11.2021 ***Revised:*** 07.12.2021 ***Accepted***: 17.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

Необходимость восстановления лесных ландшафтов в России назрела уже давно. Сейчас начался этап активного государственного участия в процессе лесовосстановления, создания карбоновых площадей, «зеленых столиц» и др. Примерами государственной поддержки служат такие программы, как: 1) Государственная программа «Развитие лесного хозяйства» от 15 апреля 2014 года №318. (в редакции постановления Правительства РФ от 31 марта 2021 г. N 511); 2) пилотный проект Минобрнауки по созданию на территории регионов России карбоновых полигонов (от февраля 2021); 3) распоряжение Белгородской обл. от 25 января 2010 года N 35-рп (с изменениями на 15 февраля 2021 года) О концепции областного проекта «Зеленая столица» и др. Все это дает толчок для активного лесоразведения и лесовосстановления, в том числе: на труднодоступных площадях и в условиях изменения климата [1]. Пытаясь учесть современные тенденции в лесовосстановлении и комплексно подойти к проблеме [2], был разработан алгоритм (рис. 1).

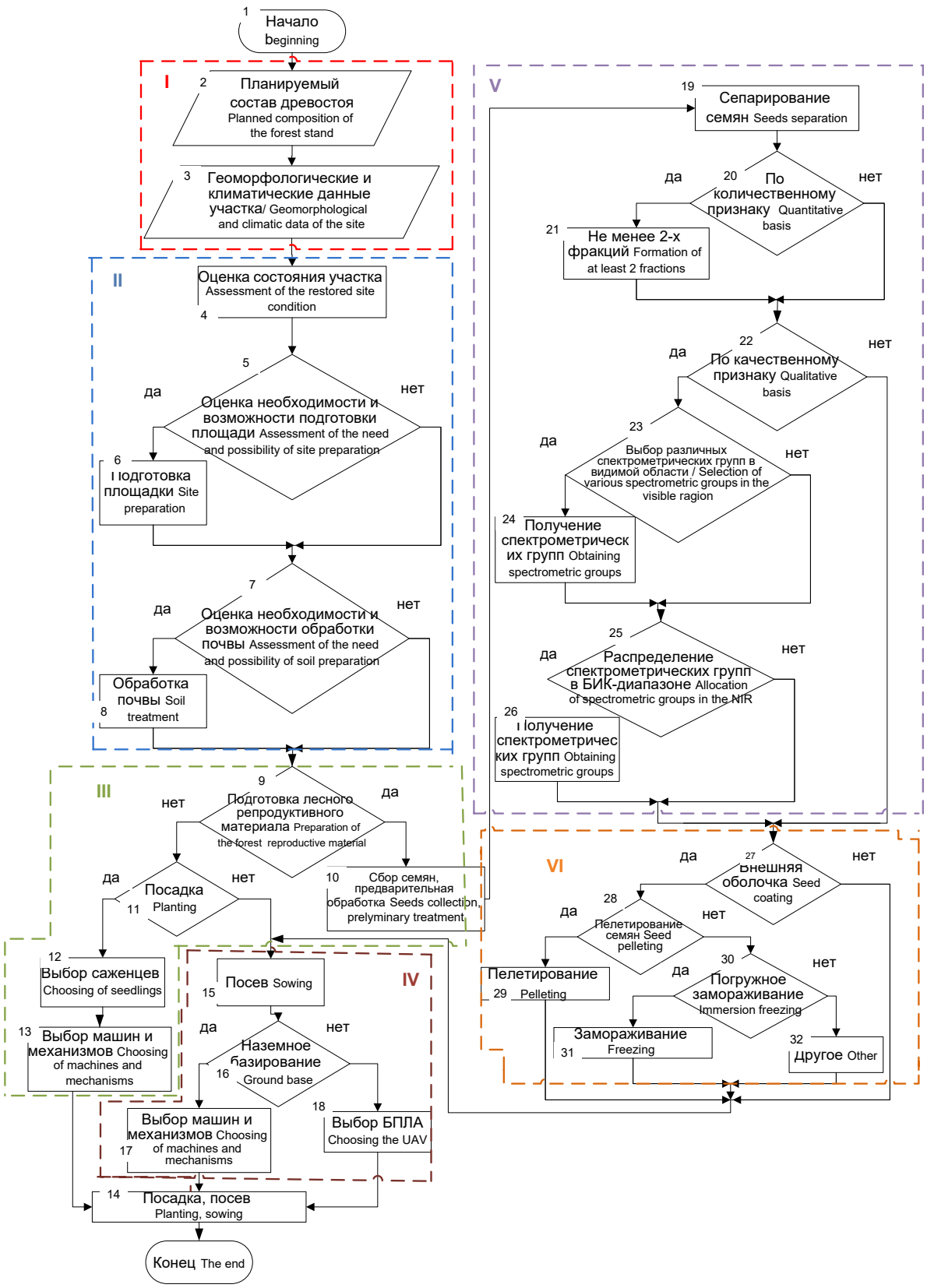


Рисунок 1. Алгоритм, учитывающий современные тенденции при лесовосстановлении

Figure 1. Algorithm that takes into account current trends in reforestation

Источник: собственная разработка автора / Source: author's own development

Алгоритм на рис. 1 структурно состоит из 32 технологических операций, значимых – 31 технологическая операция или 31 блок (оператор) алгоритма (без блока «Beginning»). Практически каждый блок алгоритма можно расписать более подробно в части его практической реализации, технических средств, моделей оборудования, производительности оборудования и другое.

Процесс лесовосстановления содержит набор технологических операций (набор блоков алгоритма). Для разработанного алгоритма существует 268 вариантов решения или 268 различных наборов технологических операций – это число было получено путем полного перебора [3].

Существует диллема – с одной стороны – необходимо детальное рассмотрение каждой технологической операции с ее декомпозицией, а с другой – необходим комплексный глобальный подход ко всему процессу лесовосстановления с учетом современных тенденций развития технологий и средств, применяемых при лесовосстановлении. Разрешением этой диллемы, на наш взгляд, может быть декомпозиция алгоритма на 6 укрупненных групп – I, II, III, IV, V, VI (на рис. 1 группы выделены пунктирными линиями различных цветов).

На основе полученных результатов методами Уорда и внутригрупповых связей можно однозначно сказать, что существуют значимые различия между технологическими операциями, обеспечивающими различные этапы лесовосстановления. Так же, данные методы косвенно подтверждают целесообразность декомпозиции разработанного алгоритма на 6 блоков исходя из технологической и технической общности операций.

Данная работа посвящена детальному рассмотрению 10-го оператора III группы (сбор семян, предварительная обработка семян) и V группы (сепарирование семян).

Материалы и методы

Теория алгоритмов использовалась для представления последовательности операционных технологий и оценки возможного набора технологий и технических средств при предварительной обработке семян и сепарировании.

Для исследования степени схожести операторов алгоритма по применимости в наборе операций реализации алгоритма использовали визуализированную матрицу близости (proximity matrix), основанную на квадрате Евклидова расстояния (Kovács et al., 2020) между операторами при агломерации набора.

Процедуру формирования иерархических групп операторов для (n>100)-количества значений матрицы реализации алгоритмов подготовки и сепарации лесных семян проводили согласно Ward-методу, подробно изложенному в классической работе Joe H. Ward Jr (Ward Jr, 1963). Здесь каждая последующая группа операторов формировалась на основе минимальной дисперсии расстояний – суммы квадратов ошибок (SSE) – между двумя группами по всем переменным (операторам) алгоритмов. Результаты агломерации операторов каждого алгоритма в иерархические группы визуализировали дендрограммой схожести. Базовой платформой для статистической интерпретации результатов исследования служила программа IBM SPSS Statistics, версия 25.

Результаты и обсуждение

В разработанном укрупненном алгоритме (рис. 1) подготовке лесосеменного материала уделено большое внимание, так как исходя из имеющихся входных данных: геоморфологические данные участка; планируемый породный состав; лесовосстановление или лесоразведение; площадь после вырубок, гарей или земли, не входящие в лесной фонд; несущие свойства грунта; количество пней на гектар; максимальный уклон участка; задерненность почвы; климатические характеристики района, можно говорить о различных вариантах лесовосстановления – различных наборах технологических операций. Однако любой набор технологических операций будет включать подготовку и сепарирование лесосеменного материала.

На рис. 2 представлена схема последовательности технологических операций подготовки лесосеменного материала хвойных пород, на которой показаны, как основные операции, так и варианты практической реализации данных технологических операций, направленные на подготовку [4-6], сепарирование [7-9], дражирование [10], капсулирование [15] лесосеменного материала хвойных пород. Набор технологических операций зависит от дальнейшего целевого использования лесосеменного материала [11].

Исходя из алгоритма лесовосстановления (рис. 1) и схемы (рис. 2) были разработаны алгоритм подготовки лесосеменного материала (рис. 3) и алгоритм сепарирования лесных семян хвойных пород (рис. 7).

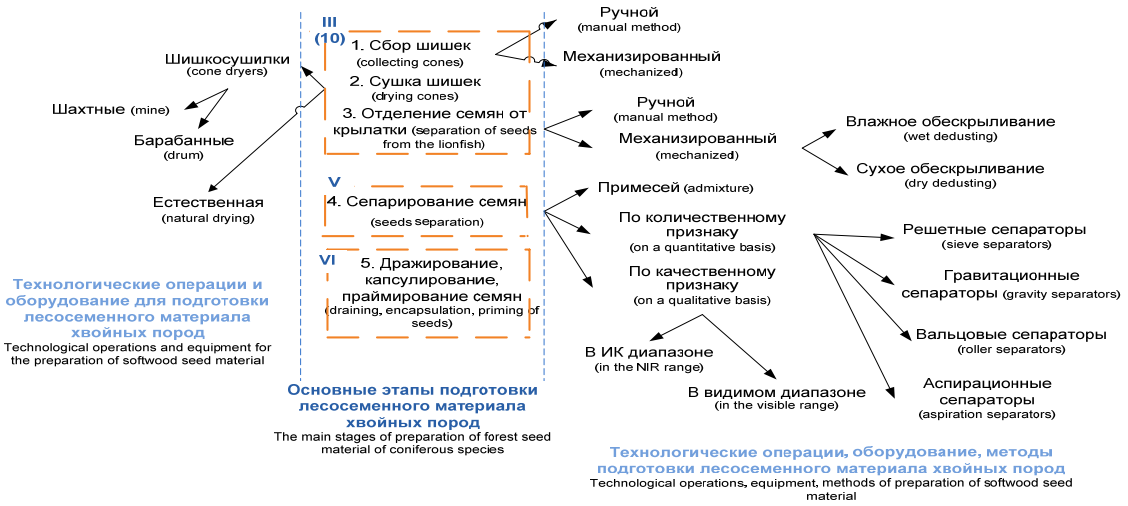


Рисунок 2. Схема последовательности технологических операций подготовки лесосеменного материала хвойных пород

Figure 2. Diagram of the sequence of technological operations for the preparation of softwood seed material

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

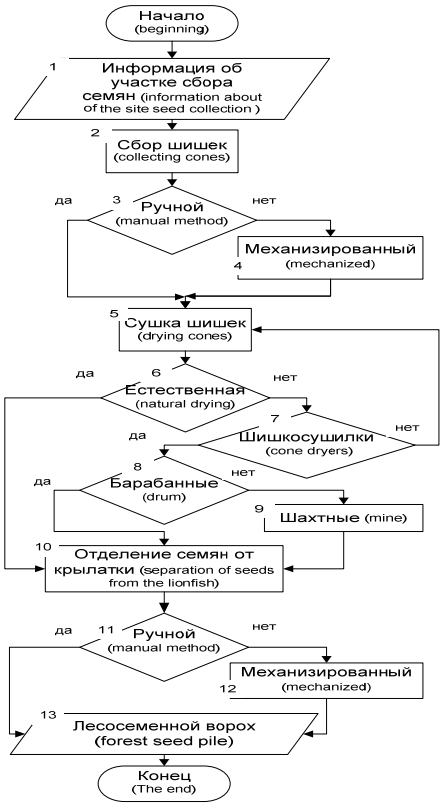


Рисунок 3. Алгоритм подготовки лесосеменного материала хвойных пород

Figure 3. Algorithm of preparation of forest seed material of coniferous species

Источник: собственная разработка автора
Source: author's own development

Алгоритм подготовки лесосеменного материала хвойных пород состоит из 13 операторов (технологических операций). Целью реализации алгоритма является подготовка лесосеменного материала хвойных пород для дальнейшей обработки семян (сепарирование, дражирование, капсулирование, праймирование и другое), либо высева семян в контейнеры в питомнике.

Для дальнейшего исследования алгоритма построили матрицу реализации алгоритма – 13×16-мерную матрицу подготовки лесных семян (рис. 4), содержащую бинарные значения. При этом столбцы матрицы соответствовали операторам алгоритма – технологическим операциям, а строки – возможным вариантам реализации алгоритма – наборам технологических операций, осуществляемым в процессе подготовки лесных семян хвойных пород.

Для исследования степени схожести операторов алгоритма по применимости в наборе операций реализации алгоритма использовали визуализированную матрицу близости (рис. 5), основанную на квадрате Евклидова расстояния между операторами при агломерации набора.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
8	7	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1
9	8	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
10	9	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1
11	10	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
12	11	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1
13	12	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
14	13	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
15	14	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	15	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1
17	16	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
18														

Рисунок 4. Часть бинарной матрицы 13×16

Figure 4. Part of a 13×16 binary matrix

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

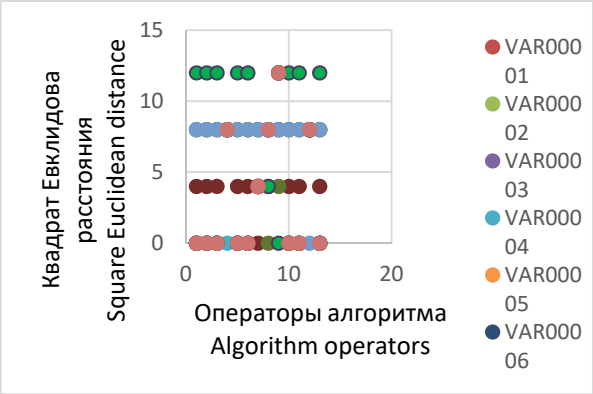


Рисунок 5. Матрица близости операторов алгоритма подготовки лесных семян

Figure 5. Operators proximity matrix of the forest seed preparation algorithm

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

Основываясь на результаты матрицы близости операторов алгоритма подготовки лесных семян (рис. 5) определено, что оператор алгоритма – технологическая операция номер 9 (сушка шишек посредством шахтных шишкосушилок), достаточно далеко удалена от центра групп. Можно сделать вывод, что в дальнейшем при разработке оптимизационной математической модели можно не учитывать данную технологическую операцию.

Процедуру формирования иерархических групп операторов для (n>100)-количества значений матрицы реализации алгоритмов подготовки лесных семян хвойных пород проводили согласно Ward-методу. Каждая последующая группа операторов формировалась на основе минимальной дисперсии расстояний – суммы квадратов ошибок (SSE) – между двумя группами по всем переменным (операторам) алгоритмов. Результаты агломерации операторов алгоритма в иерархические группы визуализированы дендрограммой схожести на рис. 6.

Анализируя дендрограмму на рисунке 6, видим, что наибольшая схожесть наблюдается у группы операторов 1, 2, 3, 5, 6, 10, 13, 11. В алгоритме подготовки лесосеменного материала хвойных пород данный набор технологических операций можно охарактеризовать, как простейший вариант набора операций. Вторая значимо отличающаяся группа состоит из операторов 1, 2, 4, 7, 8, 9. Данный набор операций можно охарактеризовать, как альтернативный.

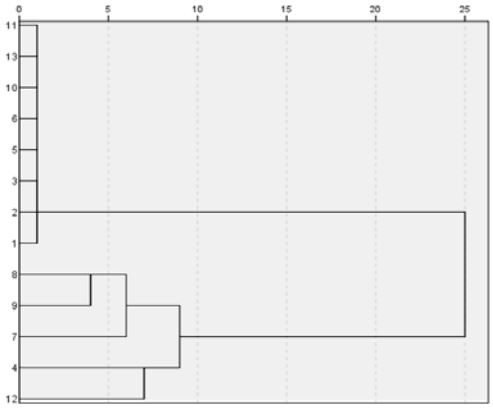


Рисунок 6. Дендрограмма агломерации операторов алгоритма подготовки лесных семян

Figure 6. Dendrogram of agglomeration operators of the forest seed preparation algorithm

Источник: собственные вычисления автора.
Source: own calculations.

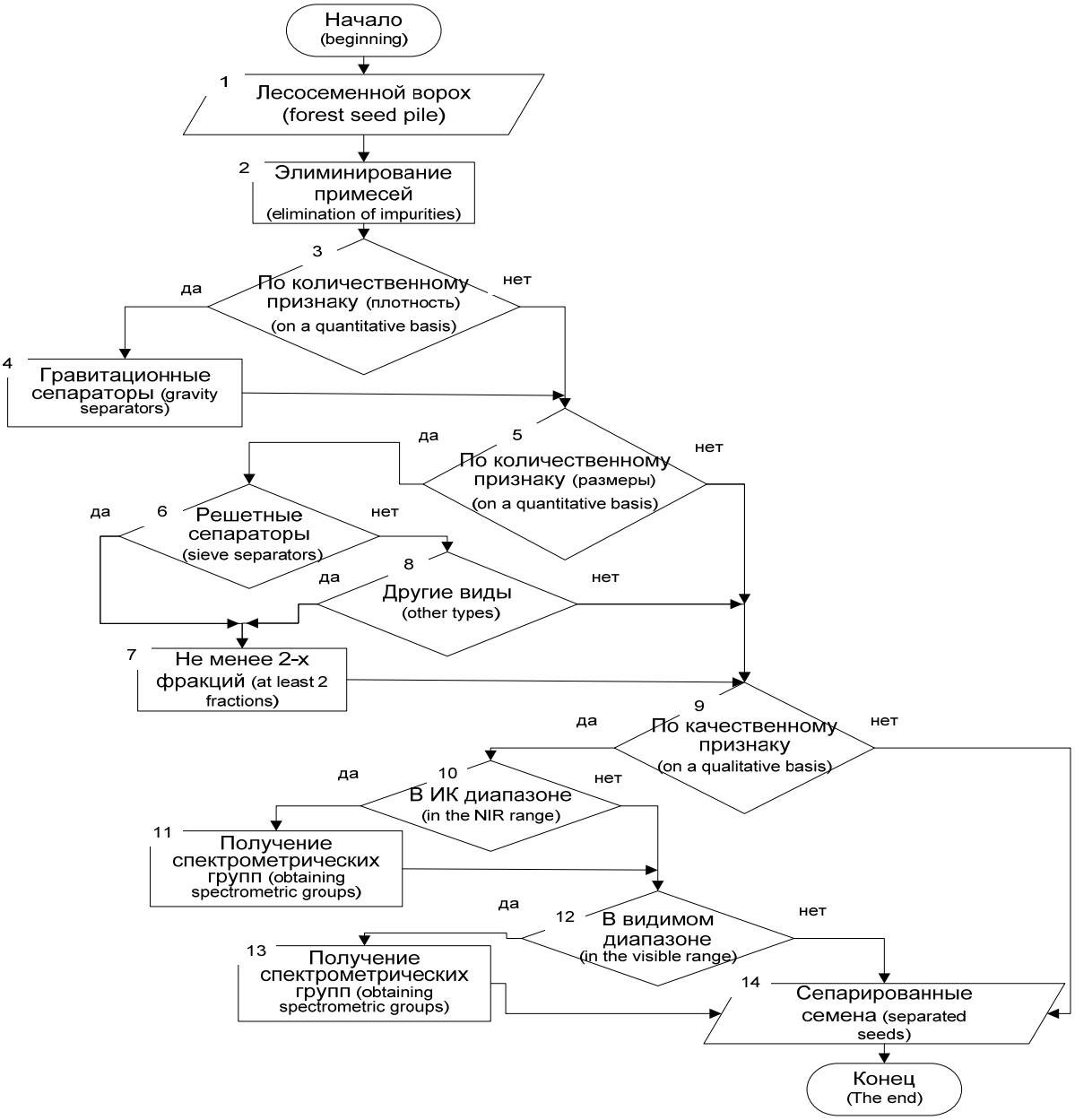


Рисунок 7. Алгоритм сепарирования лесных семян хвойных пород

Figure 7. Algorithm of coniferous forest seeds separation

Источник: собственная разработка автора

Source: author's own development

В основе алгоритма сепарирования лесных семян хвойных пород лежат исследования в области сепарирования по количественным признакам (плотности и геометрии семян) [12-14], по качественным признакам (в ИК-диапазоне и видимом диапазоне) [16-18].

Для исследования алгоритма построили 14×35-мерную матрицу сепарации лесных семян (рис. 8), содержащую бинарные значения. Столбцы матрицы соответствуют операторам алгоритма (технологическим операциям), строки – набор технологических операций.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
3	2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
5	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	5	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
7	6	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
8	7	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
9	8	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
10	9	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
11	10	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	32	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1
34	33	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
35	34	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1
36	35	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1

Рисунок 8. Часть бинарной матрицы 14×35

Figure 8. Part of a 14×35 binary matrix

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Бинарная матрица (рис. 8) легла в основу расчета матрицы близости операторов алгоритма сепарации лесных семян (рис. 9).

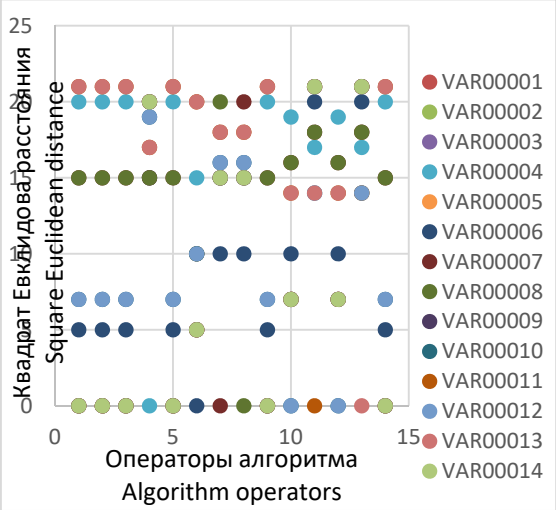


Рисунок 9. Матрица близости операторов алгоритма сепарации лесных семян

Figure 9. Operators proximity matrix of the forest seed separation algorithm

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Анализ матрицы близости операторов показывает, что нет отдельных операций далеко удаленных от центра групп. Таким образом, в дальнейших исследованиях при разработке оптимизационной математической модели необходимо рассматривать и учитывать все технологические операции представленные на рис.е 7.

Анализируя дендрограмму на рис. 10, видим, что наибольшая схожесть наблюдается между операторами в следующих группах: 1) 1,2,3,5,9,14; 2) 1,4,6,10,11,12,13; 3) 4,7,8,11,13. Опираясь на алгоритм 7, можно утверждать, что первая группа операторов описывает наиболее короткий и простой (с точки зрения технологии и применяемых технических средств) путь реализации алгоритма. Вторая группа – самый длинный и технологически наиболее сложный путь реализации алгоритма. Третья группа показывает необходимость предварительного гравитационного сепарирования перед выделением спектрометрических групп.

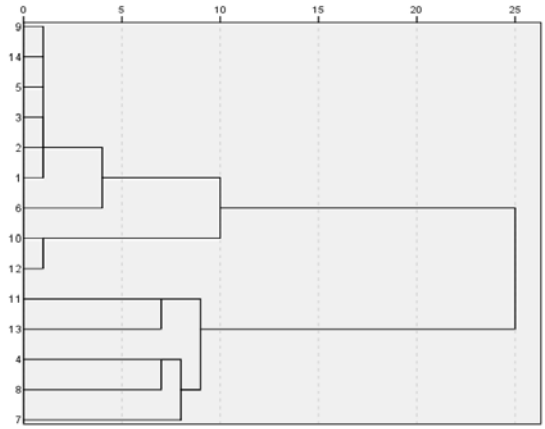


Рисунок 10. Дендрограмма агломерации операторов алгоритма сепарации лесных семян

Figure 10. Dendrogram of agglomeration operators of the forest seed separation algorithm

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

На основе полученных результатов методами Уорда и внутригрупповых связей можно однозначно сказать, что существуют значимые различия между наборами технологических операций.

Заключение

Исследования в области комплексного подхода к лесовосстановлению [19] показали необходимость детального изучения отдельных декомпозированных групп операций [3]. В данной работе разработаны алгоритм подготовки семян и алгоритм сепарирования семян, представлены бинарные матрицы, анализ схожести операций проведен Ward-методом.

Список литературы

1. Höhl M., Ahimbisibwe V., Stanturf J. A., Elsasser P., Kleine M., Bolte A. (2020). Forest Landscape Restoration – What Generates Failure and Success? Forests, 11(9), 938. https://doi.org/10.3390/f11090938.

2. Royer-Tardif S., Bauhus J., Doyon F., Nolet P., Thiffault N., Aubin I. (2021). Revisiting the Functional Zoning Concept under Climate Change to Expand the Portfolio of Adaptation Options. Forests, 12(3), 273. https://doi.org/10.3390/f12030273.

3. Novikova T.P. The choise of a set of operations for forest landscape restoration technology. Inventions. 2021. Vol. 6, no. 4. Article 98.

4. Novikov A. I., Sokolov S. V., Drapalyuk M. V., Zelikov V. A., Ivetić V. (2019). Performance of Scots Pine Seedlings from Seeds Graded by Colour. Forests, 10(12), 1064. https://doi.org/10.3390/f10121064.

5. Kaliniewicz Z., Tylek P. (2019). Aspects of the Process of Sorting European Black Pine Seeds. Forests, 10(11), 966. https://doi.org/10.3390/f10110966

6. Novikov A. I., Ersson B. T., Malyshev V. V., Petrishchev E. P., Ilunina A. A. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. 595, 012060. https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012060

7. Novikov, A., Lisitsyn, V., Tigabu, M., Tylek, P., & Chuchupal, S. (2021). Detection of Scots Pine Single Seed in Optoelectronic System of Mobile Grader: Mathematical Modeling. Forests, 12(2), 240. https://doi.org/10.3390/f12020240.

8. Barboza da Silva C., Oliveira N. M., de Carvalho M. E. A., de Medeiros A. D., de Lima Nogueira M., dos Reis A. R. (2021). Autofluorescence-spectral imaging as an innovative method for rapid, non-destructive and reliable assessing of soybean seed quality. Scientific Reports, 11(1), 17834. https://doi.org/10.1038/s41598-021-97223-5.

9. Novikov A. I. (2019). Visible wave spectrometric features of Scots pine seeds: the basis for designing a rapid analyzer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 226, 012064. https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012064.

10. Pedrini S., Balestrazzi A., Madsen M. D., Bhalsing K., Hardegree S. P., Dixon K. W., Kildisheva O. A. (2020). Seed enhancement: getting seeds restoration-ready. Restoration Ecology, 28(S3), S266–S275. https://doi.org/10.1111/rec.13184

11. Пат. 2714705 Российская Федерация, МПК A 01 G 23/00. Способ восстановления леса [Текст] / Новиков А.И. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. лесотехн. ун-т. – № 2019115418 ; заявл. 20.05.2019 ; опубл. 19.02.2020, Бюл. № 5.

12. Новиков, А. И. Дисковые сепараторы семян в лесохозяйственном производстве : монография. – Воронеж, 2017. 159 с. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25020727.

13. Драпалюк М. В., Новиков А. И. Анализ операционных механизированных технологий сепарации семян при искусственном лесовосстановлении. Лесотехнический журнал. 2018. 8(4), 207–220. https://doi.org/10.12737/article_5c1a3237290288.22345283

14. Свиридов Л. Т., Голев А. Д., Князев А. В., Новиков А. И. (2001). Устройство для очистки и калибрования лесных семян хвойных пород: пат. 2170147 Российская Федерация, МПК7 B 07 B 1/16, 1/46. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=37867773&

15. Dornyak O., Novikov A. Immersion Freezing of a Scots Pine Single Seed in a Water-Saturated Dispersion Medium: Mathematical Modelling. Inventions. 2020. Vol. 5, no. 4. Article 51. doi: 10.3390/inventions5040051.

16. Новиков А. И. Экспресс-анализ лесных семян биофизическими методами: монография. Воронеж, 2018. 128 с.

17. Соколов С. В., Новиков А. И. Тенденции развития операционной технологии аэросева беспилотными летательными аппаратами в лесовосстановительном производстве. Лесотехнический журнал 2017. Т. 7, № 4. С. 190–205. doi: 10.12737/article_5a3d040dc79c79.94513194.

18. Новиков А. И., Саушкин В. В. Исследование спектрометрических параметров семенной кожуры сосны обыкновенной в ИК-диапазоне. Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 3. С. 30–37. doi: 10.12737/article_5b97a164e41782.20107217.

19. Novikova T. P. (2021). How to optimize the operational technologies of contemporary forest landscape restoration: process control algorithm. 2nd International Electronic Conference on Forests – Sustainable Forests: Ecology, Management, Products and Trade, 01–15 September 2021, 8084. https://doi.org/10.3390/IECF2021-10810.

References

1. Höhl, M., Ahimbisibwe, V., Stanturf, J. A., Elsasser, P., Kleine, M., & Bolte, A. (2020). Forest Landscape Restoration—What Generates Failure and Success? // Forests, 11(9), 938. https://doi.org/10.3390/f11090938.

2. Royer-Tardif, S., Bauhus, J., Doyon, F., Nolet, P., Thiffault, N., & Aubin, I. (2021). Revisiting the Functional Zoning Concept under Climate Change to Expand the Portfolio of Adaptation Options // Forests, 12(3), 273. https://doi.org/10.3390/f12030273.

3. Novikova, T.P. The choise of a set of operations for forest landscape restoration technology [Electronic resource] // Inventions. – 2021. – Vol. 6, no. 4. – Article 98.

4. Novikov, A. I., Sokolov, S. V., Drapalyuk, M. V., Zelikov, V. A., & Ivetić, V. (2019). Performance of Scots Pine Seedlings from Seeds Graded by Colour // Forests, 10(12), 1064. https://doi.org/10.3390/f10121064.

5. Kaliniewicz, Z., & Tylek, P. (2019). Aspects of the Process of Sorting European Black Pine Seeds // Forests, 10(11), 966. https://doi.org/10.3390/f10110966

6. Novikov, A. I., Ersson, B. T., Malyshev, V. V., Petrishchev, E. P., Ilunina, A. A. Mechanization of coniferous seeds grading in Russia: a selected literature analysis // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. 595, 012060. https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012060

7. Novikov, A., Lisitsyn, V., Tigabu, M., Tylek, P., & Chuchupal, S. (2021). Detection of Scots Pine Single Seed in Optoelectronic System of Mobile Grader: Mathematical Modeling // Forests, 12(2), 240. https://doi.org/10.3390/f12020240

8. Barboza da Silva, C., Oliveira, N. M., de Carvalho, M. E. A., de Medeiros, A. D., de Lima Nogueira, M., & dos Reis, A. R. (2021). Autofluorescence-spectral imaging as an innovative method for rapid, non-destructive and reliable assessing of soybean seed quality // Scientific Reports, 11(1), 17834. https://doi.org/10.1038/s41598-021-97223-5.

9. Novikov, A. I. (2019). Visible wave spectrometric features of Scots pine seeds: the basis for designing a rapid analyzer. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 226, 012064. https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012064.

10. Pedrini, S., Balestrazzi, A., Madsen, M. D., Bhalsing, K., Hardegree, S. P., Dixon, K. W., & Kildisheva, O. A. (2020). Seed enhancement: getting seeds restoration-ready. Restoration Ecology, 28(S3), S266–S275. https://doi.org/10.1111/rec.13184

11. Pat. 2714705 Rossijskaya Federaciya, MPK A 01 G 23/00. Sposob vosstanovleniya lesa [Forest restoration method] / Novikov A.I. ; zayavitel` i patentoobladatel` Voronezh. gos. lesotexn. un-t. – № 2019115418 ; zayavl. 20.05.2019 ; opubl. 19.02.2020, Byul. № 5 (In Russ.).

12. Novikov, A. I. Diskovye separatory semyan v lesohozyajstvennom proizvodstve [Disc separators of seeds in forestry production] : monografiya = monograph – Voronezh: FGBOU VO VGLTU, 2017. –159 s. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25020727 (In Russ.).

13. Drapalyuk M.V., Novikov A.I. Analiz operacionnyh mekhanizirovannyh tekhnologij separacii semyan pri iskusstvennom lesovosstanovlenii [Analysis of operational mechanized seed separation technologies in artificial reforestation]. Lesotekhnicheskij zhurnal. 2018. Vol. 8, № 4. S. 207–220. doi: 10.12737/article_5c1a3237290288.22345283(In Russ.).

14. Sviridov, L. T., Golev, A. D., Knyazev, A. V., Novikov, A. I. (2001). Ustrojstvo dlya ochistki i kalibrovaniya lesnyh semyan hvojnyh porod [Device for cleaning and calibration of coniferous forest seeds]: pat. 2170147 Rossijskaya Federaciya, MPK7 V 07 V 1/16, 1/46. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=37867773& (In Russ.).

15. Dornyak O., Novikov A. Immersion Freezing of a Scots Pine Single Seed in a Water-Saturated Dispersion Medium: Mathematical Modelling // Inventions. 2020. Vol. 5, no. 4. Article 51. doi: 10.3390/inventions5040051.

16. Novikov, A. I. Ekspress-analiz lesnyh semyan biofizicheskimi metodami [Express analysis of forest seeds by biophysical methods] monografiya = monograph – Voronezh: FGBOU VO VGLTU, 2018. – 128 s. (In Russ.).

17. Sokolov S. V., Novikov A.I. Tendencii razvitiya operacionnoj tekhnologii aeroseva bespilotnymi letatel'nymi apparatami v lesovosstanovitel'nom proizvodstve [Trends in the development of the operational technology of aerial seeding by unmanned aerial vehicles in reforestation production] // Lesotekhnicheskij zhurnal. 2017. Vol. 7, № 4. S. 190–205. doi: 10.12737/article_5a3d040dc79c79.94513194. (In Russ.).

18. Novikov A. I., Saushkin V.V. Issledovanie spektrometricheskih parametrov semennoj kozhury sosny obyknovennoj v IK-diapazone [Investigation of spectrometric parameters of the seed peel of scots pine in the NIR range] // Forestry Engineering Journal. 2018. Vol. 8, № 3. S. 30–37. doi: 10.12737/article_5b97a164e41782.20107217 (In Russ.).

19. Novikova, T. P. (2021). How to optimize the operational technologies of contemporary forest landscape restoration: process control algorithm // 2nd International Electronic Conference on Forests—Sustainable Forests: Ecology, Management, Products and Trade, 01–15 September 2021, 8084. https://doi.org/10.3390/IECF2021-10810

Сведения об авторе

✉ *Новикова Татьяна Петровна* – канд. техн. 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, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1279-3960, e-mail: novikova_tp.vglta@mail.ru

Information about the author

✉ *Tatyana P. Novikova* – Cand. Sci. (Technical), Docent, Chair of Computer Technology and Microelectronic Engineering, Voronezh State Forestry University 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

✉ – Для контактов/Corresponding author

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14

УДК 630.232.312.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЮВЕНИЛЬНЫХ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ИЗ КОНДИЦИОННЫХ СЕМЯН ПРИ ОЦЕНКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ

Евгений П. Петрищев[1]✉, petrishchev.vgltu@mail.ru, 0000-0002-1395-3631

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

Для оценки результатов лесовосстановления и полноценного использования вышеуказанных алгоритмов и разработки новых необходимо знать степень взаимосвязи между биометрическими параметрами ювенильных деревьев сосны обыкновенной, выращенных из кондиционных семян. Дескриптивная статистика рассчитывалась для прямых и косвенных измерений биометрических характеристик единичных деревьев сосны обыкновенной (*container-grown 1+0, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation*), выращенных из кондиционных семян, на линейном участке экспериментальной площади (51, 49' 45.605200" ; 39, 20' 33.046700"). Прямые измерения высоты и диаметра корневой шейки сеянцев проведены непосредственно в полевых условиях. Косвенные ImageJ-измерения биометрических параметров сеянцев проведены на основании маловысотных фотоизображений в плане, полученных с камеры, установленной на беспилотном летательном аппарате четырехроторной аэродинамической схемы. Корреляционные тесты Пирсона использовались для количественной оценки корреляции между высотой молодого дерева с диаметром корневой шейки и площадью кроны. Биометрические параметры составили: высота сеянцев – 53.9 ± 16.2 см (среднее ± стандартное отклонение); диаметр корневой шейки – 7.7 ± 2.9 мм; коэффициент выносливости – 73.8 ± 17.8; площадь кроны – (229.111 ± 139.494) · 10^3 мм^2. Высота и диаметр корневой шейки сеянца сильно положительно коррелировали между собой ($r = 0.807$ при уровне значимости $p = 0.01$) и с площадью кроны ($r = 0.830$ и 0.875 соответственно при уровне значимости $p = 0.01$). Коэффициент выносливости имел обратную корреляцию с диаметром корневой шейки ($r = -0.621$ при уровне значимости $p = 0.01$), площадью кроны ($r = -0.407$ при уровне значимости $p = 0.01$) и не имел корреляционной связи с высотой сеянца.

Ключевые слова: кондиционные семена, ювенильные сеянцы, *Pinus sylvestris L.,* длина сеянца, диаметр корневой шейки, площадь кроны, коэффициент выносливости, лесовосстановление

Благодарности: Исследование выполнено в рамках договора о научно-исследовательской работе ВГЛТУ (регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР 121092000080-7). Автор благодарит работников учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ за ценные замечания и организационно-методическую помощь в проведении исследований. Автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Петрищев Е. П. Исследование взаимосвязи биометрических параметров ювенильных сеянцев сосны обыкновенной из кондиционных семян при оценке результатов лесовосстановления / Е. П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 161–169. – *Библиогр.: с. 167–169 (16 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14.

Поступила: 25.11.2021 ***Принята к публикации***: 27.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN BIOMETRIC PARAMETERS OF SCOTS PINE JUVENILE SEEDLINGS FROM CONDITIONED SEEDS WHEN ASSESSING THE RESULTS OF REFORESTATION

Evgeniy P Petrishchev[1]✉, petrishchev.vgltu@mail.ru, 0000-0002-1395-3631

[1] *FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, 8 Timiryazeva street, Voronezh, Russian Federation*

Abstract

It is necessary to know the degree of relationship between the biometric parameters of Scots pine juvenile trees grown from conditioned seeds to assess the results of reforestation and the full use of the above algorithms and the development of new ones. Descriptive statistics were calculated for direct and indirect measurements of the biometric characteristics of single Scots pine trees (container-grown 1 + 0.2017 fall plants, seed spectrometric separation) grown from conditioned seeds on a linear plot of the experimental area (51. 49 '45.605200 "; 39. 20 '33.046700"). Direct measurements of the height and diameter of the root collar of seedlings were carried out directly in the field. Indirect Image J-measurements of the biometric parameters of seedlings were carried out on the basis of low-altitude photographs in plan, obtained from a camera mounted on an unmanned aerial vehicle with a four-rotor aerodynamic scheme. Pearson correlation tests were used to quantify the correlation between young tree height with root collar diameter and crown area. Biometric parameters were as follows: seedling height - 53.9 ± 16.2 cm (mean ± standard deviation); diameter of the root collar - 7.7 ± 2.9 mm; endurance coefficient - 73.8 ± 17.8; crown area - (229.111 ± 139.494) ×103 mm^2. The height and diameter of the root collar of the seedling strongly positively correlated with each other (r = 0.807 at the p = 0.01 significance level) and with the crown area (r = 0.830 and 0.875, respectively, at the p = 0.01 significance level). The endurance coefficient had an inverse correlation with the diameter of the root collar (r = -0.621 at the significance level of p = 0.01), crown area (r = -0.407 at the significance level p = 0.01) and had no correlation with seedling height.

Keywords: conditioned seeds, juvenile seedlings, *Pinus sylvestris* L., seedling length, root collar diameter, crown area, endurance coefficient, reforestation

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the VSUFT Research Work Agreement (EGISU R&D registration number 121092000080-7). The author thanks the employees of the VSUFT educational and experimental forestry enterprise for valuable comments and organizational and methodological assistance in conducting research. The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

***For citation*:** Petrishchev E.P. (2021) Relationship investigation of biometric parameters of juvenile Scots pine seedlings from conditioned seeds in assessing the reforestation results. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 161-169 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14.

Received: 25.11.2021 ***Revised:*** 18.12.2021 ***Accepted***: 27.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

Набор данных, полученный Flora Donald с соавторами (2021) в Британском центре экологии и гидрологии, свидетельствует, что «*посадочные проекты имели неоднозначный успех в решении задач восстановления и что проводился ограниченный последующий мониторинг* [1]».

Концепция целевого растения TPC [2] (*Target Plant Concept*) устанавливает приоритеты во взаимодействии между элементами траектории лесовосстановления [3] начиная от автоматизированного питомника [4] до пересадки в поле [5]. Концепция подразумевает связь «*между спектрометрическими параметрами семян хвойных пород и молекулярными показателями сеянцев* [6]» На протяжении всего процесса необходимо оценивать биометрические параметры целевого сеянца. Как правило, этими параметрами, определяемыми на основании прямых измерений [7,8], отражающими рост и развитие сеянца сосны обыкновенной в зависимости от внешних стрессоров, являются высота сеянца и диаметр корневой шейки.

Для оценки результатов лесовосстановления (биомассы единичного дерева) бесконтактным способом с помощью недорогих конструкций беспилотного летательного аппарата четырехроторной аэродинамической схемы [9] возможно использование алгоритмов: ITCD (*Individual Tree Crown Delineation*) [10], использующего дискретное вейвлет-преобразование (DWT); OPS (*open thermodynamic system*), оценивающего «*фитомассу отдельного дерева путем деления фитомассы насаждения на количество деревьев* [11]» или других.

Однако для оценки результатов лесовосстановления и полноценного использования вышеуказанных алгоритмов и разработки новых необходимо знать степень взаимосвязи между биометрическими параметрами ювенильных деревьев сосны обыкновенной, выращенных из кондиционных семян, что одновременно является целью исследования.

Материалы и методы

Экспериментальная площадь по апробации технологии получения сеянцев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) из кондиционированных по спектрометрическим свойствам семян [12] расположена в Левобережном лесничестве Учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ рядом с кордоном Кожевенный и соответствует 51° 29′ 40″ северной широты и 39° 12′ 12″ восточной долготы в географических координатах.

На экспериментальной площади выбирали характерные линейные участки (начальная координата строки для исследования задана GPS-координатами 51, 49' 45.605200" ; 39, 20' 33.046700") и оценивали для сеянцев (*container-grown 1+0, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation*) следующие биометрические параметры:

1. На основе прямых измерений:

– диаметр корневой шейки в мм (*ДКШ, stem diameter, root collar diameter, RCD*), имеющий самую сильную корреляцию с высотой сеянца [13] на ювенильном этапе онтогенеза;

– высоту сеянца в см (*Высота*), коррелирующую с «*количеством игл на побеге* [14]» и являющейся хорошей оценкой «*фотосинтетической способности и транспирационной площади* [14]» сеянца;

– отношение высоты сеянца к диаметру корневой шейки, в рамках данного исследования определенное как безразмерный коэффициент выносливости сеянца (*КоэфВыносл, sturdiness ratio, Seedling Sturdiness Quotient, SSQ*); высокие значения данного коэффициента могут указывать на большую восприимчивость сеянца к стрессорам ветра, засухи и морозов;

2. На основе косвенных измерений:

– диаметр кроны с высоты 1 м в мм в продольном (*Двдоль*) и поперечном (*Дпоперек*) направлениях относительно оси движения беспилотного летательного аппарата (БПЛА);

– средний диаметр кроны (*ДК*) в мм как среднее арифметическое между диаметром кроны в продольном и поперечном направлениях;

– площадь кроны (*ПлощадьК*) в мм^2, соответствующая прямым измерениям диаметра корневой шейки и высоты

Прямые измерения диаметра корневой шейки (*ДКШ*) сеянца в мм проводили в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью цифрового штангенциркуля с точностью 0,1 мм, высо-

ты сеянца (*Высота*) в см – металлической линейкой с точностью 0,1 см.

Косвенные измерения на основе фотоизображений единичных деревьев в плане, полученных в видимом диапазоне длин волн на малой высоте (1 м) с помощью камеры, установленной на гироподвесе БПЛА четырехроторной аэродинамической схемы DJI Mavic 2pro, проводили на базе программного комплекса *ImageJ (IJ)* из пакета FiJi, ver. 1.53n [15] в следующем порядке.

Производили калибровку и масштабирование измерительного инструмента программы *IJ*, отложив на фотоизображении эталона 10 отрезков длиной 10 мм. Диаграмма распределения длины искомых отрезков в пикселях представлена на рис. 1, *а*. Далее в окне установки масштаба программы IJ вписали среднее значение 28,253 pix = = 10 мм, в результате чего масштаб составил 2,8253 пиксель мм$^{-1}$ (рис. 1, *б*), или 2,8 пиксель мм$^{-1}$, что вполне удовлетворяет заданной точности.

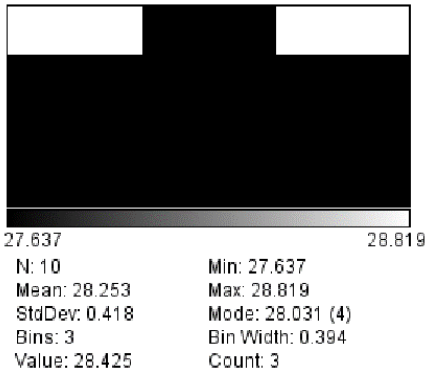
Для фотоизображений единичных деревьев в плане, полученных с помощью БПЛА, используя *IJ*-инструмент свободного выделения, ограничивали площадь кроны. После преобразования и масштабирования результаты площади кроны, а также диаметров кроны заносили в строку таблицы базы данных измерений для соответствующего молодого дерева, впоследствии добавленной в разработанную информационную базу данных лесного репродуктивного материала (FRM-library) [16].

Для всех сравниваемых количественных вариант биометрических параметров исследуемых молодых деревьев сосны обыкновенной устанавливали показатели описательной статистики, используя программу IBM SPSS Statistics, версия 25, визуализируя их *boxplot*-диаграммой. По результатам проверки нормальности распределения вариант с помощью частотных гистограмм для определения степени связи между вариантами использовали метод парных корреляций, характеризуемый коэффициентом Пирсона *r* и двусторонним критерием значимости *p*.

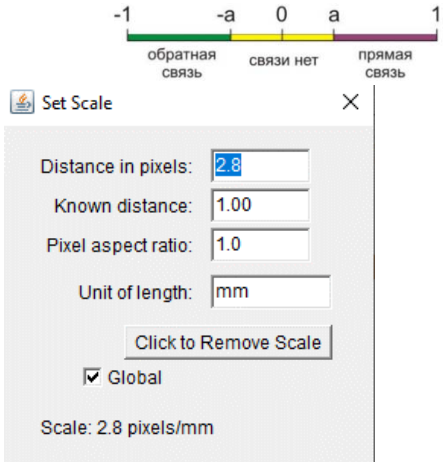
Результаты и обсуждение

Распределение вариант биометрических параметров молодых деревьев сосны обыкновенной при прямых и косвенных измерениях с использованием в качестве меры центральной тенденции среднего арифметического значения представлено в табл. 1 и на рис. 1.

Поскольку исследуемые переменные представляют собой количественные (метрические) величины, то оценку взаимосвязи между ними целесообразно производить на основании коэффициента корреляции *r* Пирсона (табл. 2, рис. 2), критические значения *a* которого для количества проведенных наблюдений (N = 47) и уровней значимости p = 0,05, 0,01 и 0,001 находятся в пределах *a* = 0,29; 0,37 и 0,47 соответственно.



а



б

Рисунок 8. Диаграмма масштабирования *IJ*-измерительного инструмента (а) и масштаб (б) для косвенных измерений параметров кроны единичного молодого дерева сосны обыкновенной в плане

Figure 2. The scaling diagram of the *IJ*-measuring instrument (a) and the scale (b) for indirect measurements of the crown parameters of a single young Scots pine tree in the plan

Источник: собственная композиция автора/source: author's composition

Таблица 4

Дескриптивная статистика прямых и БПЛА-оптических измерений биометрических параметров единичного молодого дерева сосны обыкновенной (N = 47)

Table 4

Descriptive statistics of direct and UAV-optical measurements of biometric parameters of a single young Scots pine tree (N = 47)

Параметры | Parameters	Минимум | Minimum	Максимум | Maximum	Среднее | Mean		СКО | SD	Дисперсия | Dispersion
	Статистика | Statistic	Статистика | Statistic	Статистика | Statistic	ошибка | Std Error	Статистика | Statistic	Статистика | Statistic
Прямые измерения | Direct measurements						
Высота, см | Height, cm	18,5	97,5	53,9	2,4	16,2	260,9
ДКШ, мм | RCD, mm	2,4	14,0	7,7	0,4	2,9	8,3
Косвенные измерения | Indirect measurements						
КоэфВынос | SSQ	47,0	119,0	73,8	2,6	17,8	318,376
Двдоль, мм | Dalong, mm	82,0	937,0	580,7	34,8	238,3	56794,4
Дпоперек, мм | Dacross, mm	49,0	976,0	586,2	33,3	228,5	52228,3
ДК, мм | CD, mm	65,5	890,0	583,5	33,0	226,6	51326,9
ПлощадьК, 10^3 мм^2 | SquareC, 10^3 mm^2	3,746	489,357	229,111	20,347	139,494	$194 \cdot 10^8$

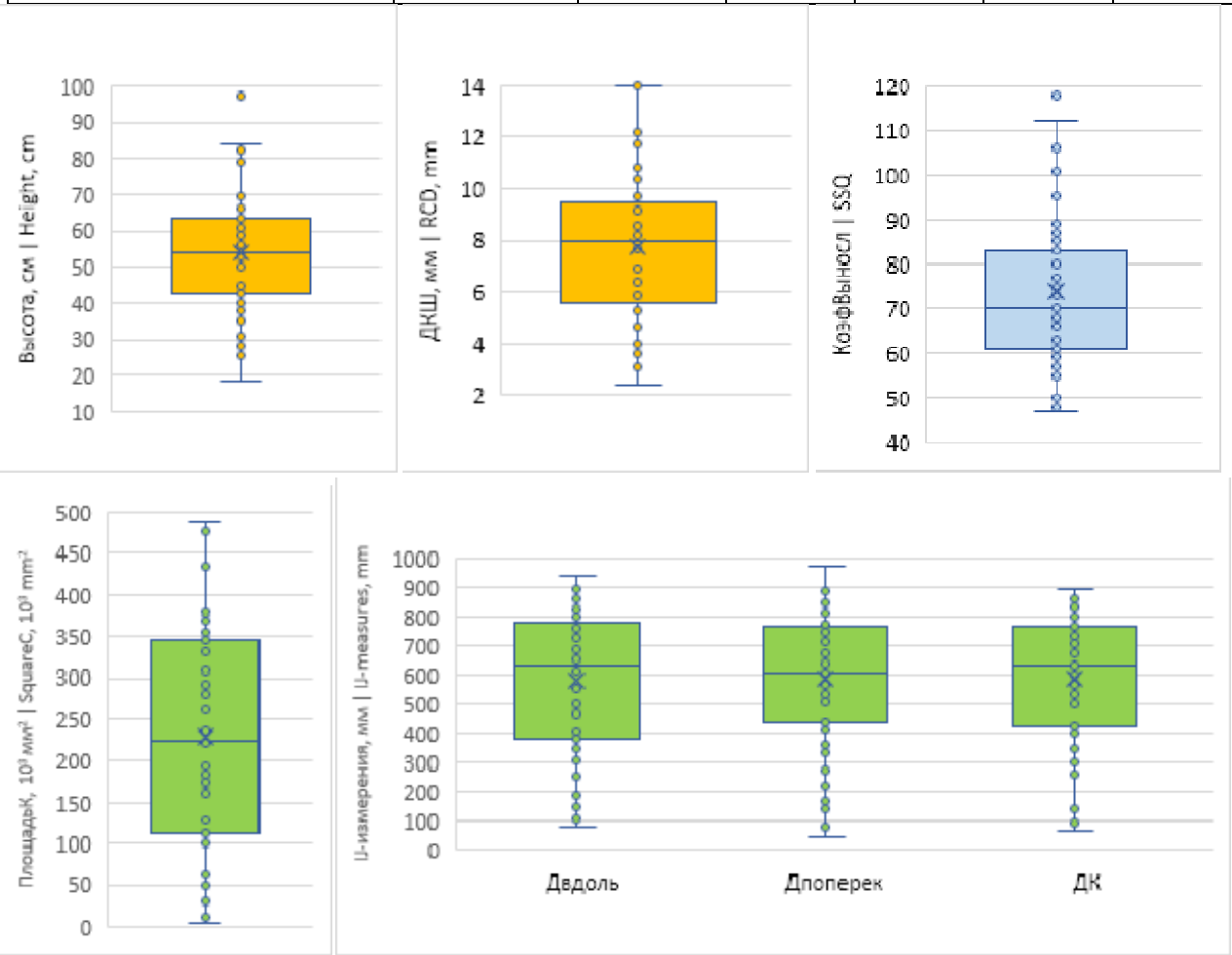


Рисунок 9. Диаграмма распределения вариант биометрических параметров сеянцев сосны обыкновенной. Здесь точкой за пределами диаграммы показано выскочившее значение вариант (выброс), крестиком – среднее, средней линией в прямоугольнике – медиана, расстоянием между верхним и нижним вискером – размах, или разница максимального и минимального значения

Figure 3. Boxplot diagram of biometric parameters of Scots pine seedlings. Here, a dot outside the diagram shows the popped-out value option (outlier), a cross – the average, the median line in the rectangle, the distance between the upper and lower "whiskers" - the span, or the difference between the maximum and minimum values

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

Таблица 5

Корреляционный анализ (r-Пирсон) биометрических параметров сеянцев сосны обыкновенной (*container-grown* 1+0*, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation*), полученных на основе фотоизображения в плане, и прямых измерений

Table 5

Correlation analysis (r-Pearson) of biometric parameters of 3-year-old container-grown seedlings of Scots pine (*container-grown* 1+0*, 2017 Fall plants, seed spectrometric separation*), obtained on the basis of a plan image and direct measurements

Параметры | Parameters		Высота Height	ДКШ| RCD	КВ SSQ	Двдоль Dalong	Дпоперек Dacross	ДК CD	ПлощадьК SquareC
Высота Height	Корреляция | Correlation	1	**0,807****	-0,100	0,840**	0,794**	0,843**	0,830**
	Значимость | Significance		0,000	0,504	0,000	0,000	0,000	0,000
ДКШ| RCD	Корреляция | Correlation	**0,807****	1	**-0,621****	0,817**	0,822**	0,845**	0,875**
	Значимость | Significance	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
КВ SSQ	Корреляция | Correlation	-0,100	-0,621**	1	-0,346*	-0,363*	-0,365*	-0,407**
	Значимость | Significance	0,504	0,000		0,017	0,012	0,012	0,004
Двдоль Dalong	Корреляция | Correlation	0,840**	0,817**	-0,346*	1	0,884**	0,972**	0,913**
	Значимость | Significance	0,000	0,000	0,017		0,000	0,000	0,000
Дпоперек Dacross	Корреляция | Correlation	0,794**	0,822**	-0,363*	0,884**	1	0,969**	0,932**
	Значимость | Significance	0,000	0,000	0,012	0,000		0,000	0,000
ДК CD	Корреляция | Correlation	0,843**	0,845**	-0,365*	0,972**	0,969**	1	0,951**
	Значимость | Significance	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000		0,000
ПлощадьК SquareC	Корреляция | Correlation	**0,830****	**0,875****	-0,407**	0,913**	0,932**	0,951**	1
	Значимость | Significance	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	
**. Корреляция значима на уровне p = 0,01 (двухсторонняя). Correlation is significant at the level of p = 0.01 (two-way)								
*. Корреляция значима на уровне p = 0,05 (двухсторонняя). Correlation is significant at the level of p = 0.05 (two-way)								

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

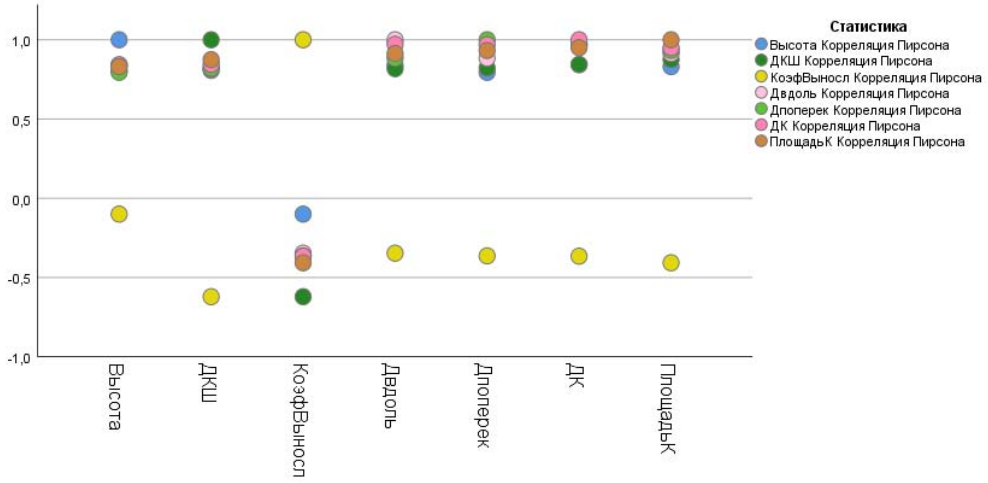


Рисунок 3. Диаграмма рассеяния коэффициентов корреляции Пирсона между биометрическими параметрами

Figure 3. Pearson correlation coefficients scatter-plot between biometric parameters

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Количественная мера совместной изменчивости двух переменных – высоты сеянцев и площади кроны, характеризуется сильной положительной связью r = 0,843 на уровне значимости p = 0,01.

Заключение

1. Для бесконтактного и быстрого прогнозирования и оценки результатов лесовосстановления (биометрических параметров единичного молодого дерева) на линейных участках сосны обыкновенной (1+0, *container*, 2017 *Fall plants, seed spectrometric separation*), полученных на основе маловысотных косвенных БПЛА-измерений, целесообразно использовать параметры диаметра и площади кроны в плане.

2. Коэффициент корреляции Пирсона между прямыми измерениями высоты и диаметра корневой шейки сеянца сосны обыкновенной из кондиционных по спектрометрическому признаку семян составляет r = 0,807 при уровне значимости p = 0,01.

3. Коэффициенты корреляции Пирсона между высотой и площадью кроны, диаметром корневой шейки и площадью кроны сеянца сосны обыкновенной из кондиционных по спектрометрическому признаку семян составляют r = 0,830 и 0,875 соответственно при уровне значимости p = 0,01; таким образом, наблюдается сильная положительная связь между биометрическими параметрами, определяющая неизменное увеличение одного параметра при увеличении другого.

Список литературы

1. Donald, F.; Purse, B. V.; Green, S. Investigating the Role of Restoration Plantings in Introducing Disease—A Case Study Using Phytophthora. *Forests* **2021**, *12*, 764, doi:10.3390/f12060764.
2. Davis, A.S.; Pinto, J.R. The Scientific Basis of the Target Plant Concept: An Overview. *Forests* **2021**, *12*, 1293, doi:10.3390/f12091293.
3. Fargione, J.; Haase, D.L.; Burney, O.T.; Kildisheva, O.A.; Edge, G.; Cook-Patton, S.C.; Chapman, T.; Rempel, A.; Hurteau, M.D.; Davis, K.T.; et al. Challenges to the Reforestation Pipeline in the United States. *Front. For. Glob. Chang.* **2021**, *4*, 1–18, doi:10.3389/ffgc.2021.629198.
4. Grossnickle, S.C.; Kiiskila, S.B.; Haase, D.L. Seedling Ecophysiology: Five Questions To Explore in the Nursery for Optimizing Subsequent Field Success. *Tree Plant. Notes* **2020**, *63*, 112–127.
5. Grossnickle, S.C. *Ecophysiology of Northern Spruce Species: The Performance of Planted Seedlings*; P.B. Cavers (University of Western Ontario), Ed.; NRC Research Press: Ottawa, Canada, 2000; ISBN 0660179598.
6. Ivetić, V.; Novikov, A.; Daneshvar, A.; Ahmadi-Afzadi, M. Correlation between the Spectrometric Parameters of Coniferous Seeds and the Molecular Indicators of Seedlings: Is It Possible to Apply It in Practice? *Environ. Sci. Proc.* **2020**, *3*, 18, doi:10.3390/IECF2020-08084.
7. Novikov, A.I.; Sokolov, S.V.; Drapalyuk, M.V.; Zelikov, V.A.; Ivetić, V. Performance of Scots Pine Seedlings from Seeds Graded by Colour. *Forests* **2019**, *10*, 1064, doi:10.3390/f10121064.
8. Novikov, A.I.; Ivetić, V. The effect of seed size grading on seed use efficiency and height of one-year-old container-grown Scots pine (Pinus sylvestris L.) seedlings. *Reforesta* **2018**, *6*, 100–109, doi:10.21750/REFOR.6.08.61.
9. Felix, Castro, F.; Spalevic, V.; Curovic, M.; Luiz Mincato, R. Comparing pixel- and object- based forest canopy gaps classification using low-cost unmanned aerial vehicle imagery. *Agric. For.* **2021**, *67*, 19–29, doi:10.17707/AgricultForest.67.3.02.
10. Safonova, A.; Hamad, Y.; Dmitriev, E.; Georgiev, G.; Trenkin, V.; Georgieva, M.; Dimitrov, S.; Iliev, M. Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of Vital Status of Forest Stands from UAV Images. *Drones* **2021**, *5*, 77, doi:10.3390/drones5030077.
11. Lisitsyn, V.I.; Matveev, N.N.; Saushkin, V. V Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2021**, *875*, 012042, doi:10.1088/1755-1315/875/1/012042.

12. Novikov, A.I.; Ivetić, V. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2019**, *226*, 012043, doi:10.1088/1755-1315/226/1/012043.

13. Ivetić, V.; Grossnickle, S.; Škorić, M. Forecasting the field performance of Austrian pine seedlings using morphological attributes. *iForest - Biogeosciences For.* **2016**, *10*, 99–107, doi:10.3832/ifor1722-009.

14. Dumroese, K.; Landis, T.; Pinto, J.; Haase, D.; Wilkinson, K.; Davis, A. Meeting Forest Restoration Challenges: Using the Target Plant Concept. *Reforesta* **2016**, 37–52, doi:10.21750/REFOR.1.03.3.

15. Ferreira, T.; Rasband, W. *ImageJ User Guide*; 2020;

16. Novikov, A.I.; Ivetić, V.; Novikova, T.P.; Petrishchev, E.P. Scots Pine Seedlings Growth Dynamics Data Reveals Properties for the Future Proof of Seed Coat Color Grading Conjecture. *Data* **2019**, *4*, 106, doi:10.3390/data4030106.

References

1. Donald, F.; Purse, B. V.; Green, S. Investigating the Role of Restoration Plantings in Introducing Disease—A Case Study Using Phytophthora. *Forests* **2021**, *12*, 764, doi:10.3390/f12060764.

2. Davis, A.S.; Pinto, J.R. The Scientific Basis of the Target Plant Concept: An Overview. *Forests* **2021**, *12*, 1293, doi:10.3390/f12091293.

3. Fargione, J.; Haase, D.L.; Burney, O.T.; Kildisheva, O.A.; Edge, G.; Cook-Patton, S.C.; Chapman, T.; Rempel, A.; Hurteau, M.D.; Davis, K.T.; et al. Challenges to the Reforestation Pipeline in the United States. *Front. For. Glob. Chang.* **2021**, *4*, 1–18, doi:10.3389/ffgc.2021.629198.

4. Grossnickle, S.C.; Kiiskila, S.B.; Haase, D.L. Seedling Ecophysiology: Five Questions To Explore in the Nursery for Optimizing Subsequent Field Success. *Tree Plant. Notes* **2020**, *63*, 112–127.

5. Grossnickle, S.C. *Ecophysiology of Northern Spruce Species: The Performance of Planted Seedlings*; P.B. Cavers (University of Western Ontario), Ed.; NRC Research Press: Ottawa, Canada, 2000; ISBN 0660179598.

6. Ivetić, V.; Novikov, A.; Daneshvar, A.; Ahmadi-Afzadi, M. Correlation between the Spectrometric Parameters of Coniferous Seeds and the Molecular Indicators of Seedlings: Is It Possible to Apply It in Practice? *Environ. Sci. Proc.* **2020**, *3*, 18, doi:10.3390/IECF2020-08084.

7. Novikov, A.I.; Sokolov, S.V.; Drapalyuk, M.V.; Zelikov, V.A.; Ivetić, V. Performance of Scots Pine Seedlings from Seeds Graded by Colour. *Forests* **2019**, *10*, 1064, doi:10.3390/f10121064.

8. Novikov, A.I.; Ivetić, V. The effect of seed size grading on seed use efficiency and height of one-year-old container-grown Scots pine (Pinus sylvestris L.) seedlings. *Reforesta* **2018**, *6*, 100–109, doi:10.21750/REFOR.6.08.61.

9. Felix, Castro, F.; Spalevic, V.; Curovic, M.; Luiz Mincato, R. Comparing pixel- and object- based forest canopy gaps classification using low-cost unmanned aerial vehicle imagery. *Agric. For.* **2021**, *67*, 19–29, doi:10.17707/AgricultForest.67.3.02.

10. Safonova, A.; Hamad, Y.; Dmitriev, E.; Georgiev, G.; Trenkin, V.; Georgieva, M.; Dimitrov, S.; Iliev, M. Individual Tree Crown Delineation for the Species Classification and Assessment of Vital Status of Forest Stands from UAV Images. *Drones* **2021**, *5*, 77, doi:10.3390/drones5030077.

11. Lisitsyn, V.I.; Matveev, N.N.; Saushkin, V. V Ecological and physiological modelling of mixed stand dynamics. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2021**, *875*, 012042, doi:10.1088/1755-1315/875/1/012042.

12. Novikov, A.I.; Ivetić, V. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2019**, *226*, 012043, doi:10.1088/1755-1315/226/1/012043.

13. Ivetić, V.; Grossnickle, S.; Škorić, M. Forecasting the field performance of Austrian pine seedlings using morphological attributes. *iForest - Biogeosciences For.* **2016**, *10*, 99–107, doi:10.3832/ifor1722-009.

14. Dumroese, K.; Landis, T.; Pinto, J.; Haase, D.; Wilkinson, K.; Davis, A. Meeting Forest Restoration Challenges: Using the Target Plant Concept. *Reforesta* **2016**, 37–52, doi:10.21750/REFOR.1.03.3.

15. Ferreira, T.; Rasband, W. *ImageJ User Guide*; 2020;

16. Novikov, A.I.; Ivetić, V.; Novikova, T.P.; Petrishchev, E.P. Scots Pine Seedlings Growth Dynamics Data Reveals Properties for the Future Proof of Seed Coat Color Grading Conjecture. *Data* **2019**, *4*, 106, doi:10.3390/data4030106.

Сведения об авторе

✉ *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 author

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

✉ – Для контактов/Corresponding author

DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/15

УДК 630*377.44

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ ТРАКТОРА НА УХОДЕ ЗА ЛЕСНЫМИ КУЛЬТУРАМИ С РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ АГРЕГАТИРОВАНИЯ

Максим В. Подрубалов[1], podrubalov@mgul.ac.ru, 0000-0003-2589-5659
Евгений Е. Клубничкин[1] ✉, klubnichkin@mgul.ac.ru, 0000-0002-4086-1011
Леонид Д. Бухтояров[2], vglta-mlx@yandex.ru, 0000-0002-7428-0821

[1]*Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана», ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, 141005, Российская Федерация*

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

В данной работе произведены оценки испытаний трактора класса 2 интегральной компоновки ЛТЗ -155, с передним или задним, и комбинированным агрегатированнием, с возможностью совмещения операций при возделывании пропашных и лесных культур путем применения комбинированных агрегатов с лесохозяйственными и сельхозмашинами передней и задней навесках. Показана оценка работоспособности и эффективности использования таких агрегатов от их вибронагруженности. В ходе экспериментальных исследований трактора с различными способами навески (задней, передней, одновременно передней и задней) культиватора весом 2200 кг были получены тензометрированием горизонтальные и вертикальные составляющие тягового сопротивления, а также крутящие моменты на ведущих колесах трактора. Работа трактора проходила на специально подготовленном полигоне под лесовосстановление, на глубину 4 и 8 см соответственно для заднего и переднего культиватора. Разработанные тензометрические рамки использовались при анализе возникаемого тягового сопротивления. В полевых условиях установлено, что динамика процессов силовых параметров у агрегата с передним и задним культиваторами существенно ниже, чем только с передним или задним, а абсолютное значение превышает 2 т., т.е. тяговый класс трактора. Примененный спектрально корреляционный анализ показал, что для испытываемых агрегатов эти процессы имеют низкочастотные спектры (до 1 Гц) и относительно друг друга являются «белым» шумом. Это при математическом моделировании упрощает формирование структур подсистем «воздействие» и «машина».

Ключевые слова: трактор, агрегат, силовые параметры, взаимный анализ, белый шум, моделирование

Благодарности: Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-11-2019-030 от 22 ноября 2019 г.

Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Подрубалов М. В. Экспериментальные исследования нагруженности трактора на уходе за лесными культурами с разными способами агрегатирования / М. В. Подрубалов, Е. Е. Клубничкин, Л. Д. Бухтояров // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 170–180. – *Библиогр.: с. 177–179 (13 назв.).* – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/15.

Поступила: 30.10.2021 ***Принята к публикации***: 27.12.2021 ***Опубликована онлайн***: 30.12.2021

EXPERIMENTAL STUDIES OF TRACTOR LOAD DURING THE CARE OF FOREST PLANTATIONS USING DIFFERENT AGGREGATION METHODS

Maksim V. Podrubalov[1], podrubalov@mgul.ac.ru, 0000-0003-2589-5659
Evgeniy E. Klubnichkin[1] ✉, klubnichkin@mgul.ac.ru, 0000-0002-4086-1011
Leonid D. Bukhtoyarov[2], vglta-mlx@yandex.ru, 0000-0002-7428-0821

[1] *Mytishchi branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 141005, 1st Institutskaya street, 1, Mytishchi, Russian Federation*

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

Abstract

This work evaluates the tests of a 2 class tractor (integrated packaging LTZ -155) with front, rear, and combined aggregation, with the possibility of combining operations in the cultivation of row crops and forest plantations by using combined aggregates with forestry and agricultural vehicles with front and rear hinges. An assessment of the performance and efficiency of using such units with their vibration loading has been shown. During experimental studies of the tractor with different mounting methods (rear, front, both front and rear) of a cultivator weighing 2200 kg, horizontal and vertical components of traction resistance, as well as torques on the driving wheels of the tractor, were obtained by tensometric measurements. The work of the tractor took place at a specially prepared landfill for reforestation, to a depth of 4 and 8 cm, respectively, for the rear and front cultivators. The developed tensometric framework was used to analyze the resulting traction resistance. Field tests showed that the dynamics of the processes of power parameters for a unit with front and rear cultivators was significantly lower than with only front or rear cultivators. The absolute value exceeded 2 tons, i.e. traction class of the tractor. The applied spectral correlation analysis showed that these processes had low-frequency spectra (up to 1 Hz). They were “white” noise relative to each other. This, in mathematical modeling, simplifies the formation of the structures of the "impact" and "machine" subsystems.

Keywords: tractor, unit, power parameters, mutual analysis, white noise, modeling

Acknowledgments: The work was carried out at the Bauman Moscow State Technical University with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-11-2019-030 dated November 22, 2019.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

***For citation*:** Podrubalov M. V., Klubnichkin E. E., Bukhtoyarov L. D. (2021) Experimental research of tractor loading on the care of forest crops with different aggregation methods. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 170-180 (in Russian). DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/15.

Received: 30.10.2021 ***Revised:*** 18.12.2021 ***Accepted for publication***: 27.12.2021 ***Published online***: 30.12.2021

Введение

Одной из главных отличительных особенностей трактора класса 2 ЛТЗ -155, на базе которой существенно повышается производительность труда, является возможность совмещения операций при возделывании пропашных и лесных культур путем применения комбинированных агрегатов с лесохозяйственными и сельхозмашинами передней и задней навесках [1, 2, 3, 4]. Однако работоспособность и эффективность использования таких агрегатов в существенной мере будет зависеть от их вибронагруженности [5, 6, 7, 8].

В свою очередь вопросы вибронагруженности входных и выходных процессов по отношению к динамической системе трактора интегрального типа при сравнении работы с передним, задним и комбинированным агрегатированием недостаточно изучены [9, 10, 11, 12, 13]. В современных условиях это не дает возможности корректно решать и ставить задачи, связанные со снижением вибронагруженности узлов и агрегатов трактора, а также оценки его тяговой динамики.

Материалы и методы

Нами были проведены испытания трактора ЛТЗ специально оборудованного лесохозяйственным и лесовосстановительным агрегатами. Мы устанавливали на трактор оборудование сходное по своим характеристика с культиватором КРШ – 8.1 (массой 2200 кг). При проведении экспериментов оборудование устанавливалось: 1 - на передней и задней навесках трактора, 2 - только на задней навеске трактора, 3 – только на передней навеске трактора. При исследованиях были получены результаты временных входных и выходных тяговых сопротивлений и крутящих моментов, а именно вертикальная составляющая тягового сопротивления и крутящие моменты на ведущих колёсах.

Работа трактора происходила на специально подготовленном под лесовосстановление полигоне. Почва на полигоне во время испытаний: 1 – влажность от 12 до 14%; 2 - твердость от 4 до 6 ударов ударником ДорНИИ с малым наконечником. Трактор на момент проведения испытаний имел ходовую систему со сдвоенными шинами, шины 9.5-42 мод. Я – 183. Давление воздуха в шинах регулировалось согласно утверждённой методики проведения испытаний: 1 - давление воздуха в шинах ведущих колес 0.15 – 0.14 МПа для комбинации с передней и задней навесками; 2 - давление воздуха в шинах ведущих колес 0.14 – 0.12 МПа с передней навеской; 3 – давление воздуха в шинах ведущих колес 0.11 – 0.10 МПа с традиционным расположением орудия.

Нами было разработано специальное измерительное оборудование, для сбора и последующего анализа тягового процесса сопротивления движения трактора во время проведения испытаний. Основным элементом разработанного оборудования являются тензометрические рамки представленные на схеме номер 1 рис. 1. Для обеспечения нормированных среднеквадратических ошибок оценок основных статистических характеристик процессов, вызванных конечностью длин реализаций 7-20% использовались длины реализаций процессов от 15 до 40 секунд.

Формирование числовых массивов из временных реализаций процессов, зарегистрированных на осциллографической ленте, проводилось с помощью аналого-цифрового преобразователя ЭВМ ВС-1045 по специально разработанным программам, позволяющим проводить авто - и взаимнокорреляционный и спектральный анализы двух процессов по системе «вход-выход».

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены оценки характеристик вибронагруженности, рассчитанные для типичных в проведенных исследованиях реализаций входных и выходных процессов. Можно видеть, что для всех вариантов агрегатирования математические ожидания крутящих моментов на колесах левого борта больше (в 1.25 – 1.38 раза), чем правого, что может быть объяснено проявившейся ассиметрией в наладке навесных систем или культиваторов.

Эксперимент показывает, что за счет лучших сцепных качеств, суммарная нагруженность задних колес, идущих по следу в 1.19-1.46 раза выше, чем передних. Испытываемый трактор имел самоблокирующийся дифференциал храпового типа у передних колес и конический дифференциал у задних колес. Данные табл. 1 свидетельствуют, что конический дифференциал обеспечивает меньшую не-

равномерность крутящих моментов на колесах, чем дифференциал храпового типа. При этом отношение оценок математических ожиданий моментов на задних колесах составляет величины 1.11-1.21, а на передних 1.45-1.69.

Из таблиц видно, что средние значения горизонтальной составляющей тяговых сопротивлений от одного культиватора составляют значения 9-12 кН. Для комбинированного агрегата суммарная величина этого входного параметра равна 22.4 кН, что несколько повышает тяговый класса трактора. Вертикальные же составляющие тяговых сопротивлений от культиваторов близки к нулю и из роль в перераспределении сцепного веса трактора весьма мала.

Анализ уровня оценок коэффициентов вариации показывает, что при работе трактора с культиваторами на передней или задней навесках степень изменчивости процессов крутящих моментов на колесах существенно ниже, чем для комбинированного агрегата. Так, средние значения коэффициентов вариации для этих процессов в условиях переднего и заднего агрегатирования составляет величины 27,6 и 24,5 %, в то время как для комбинированного 10,4 %. Причем уровень средних квадратических отклонений моментов для различного агрегатирования приблизительно одинаков.

Из результатов проведенного эксперимента следует (табл. 1), что динамика изменения величины горизонтальной составляющей тягового сопротивления от культиватора на передней навеске заметно больше, чем от культиватора при традиционном (заднем) агрегатировании. Это проявляется как при сравнении абсолютных значений оценок средних квадратических отклонений, так и коэффициентов вариации. По абсолютным значениям средних квадратических отклонений также видно, что динамика процессов вертикальных составляющих тяговых сопротивлений при комбинированном агрегатировании (табл. 1) лежит в тех же пределах, что и для горизонтальных составляющих.

Спектральный анализ исследуемых процессов нагруженности показывает (рис. 2, 3), что их дисперсия лежит в области низких частот (до 1-2 Гц). Причем, качественного различия между спектрами крутящих моментов на передних, задних и стоящих по разным бортам трактора колесах как для переднего и заднего, так и комбинированного агрегатирования, не наблюдается (рис. 2 а, 3 а).

На рис. 4 представлены нормированные взаимно корреляционные функции (а) и функции когерентности (б) процессов.

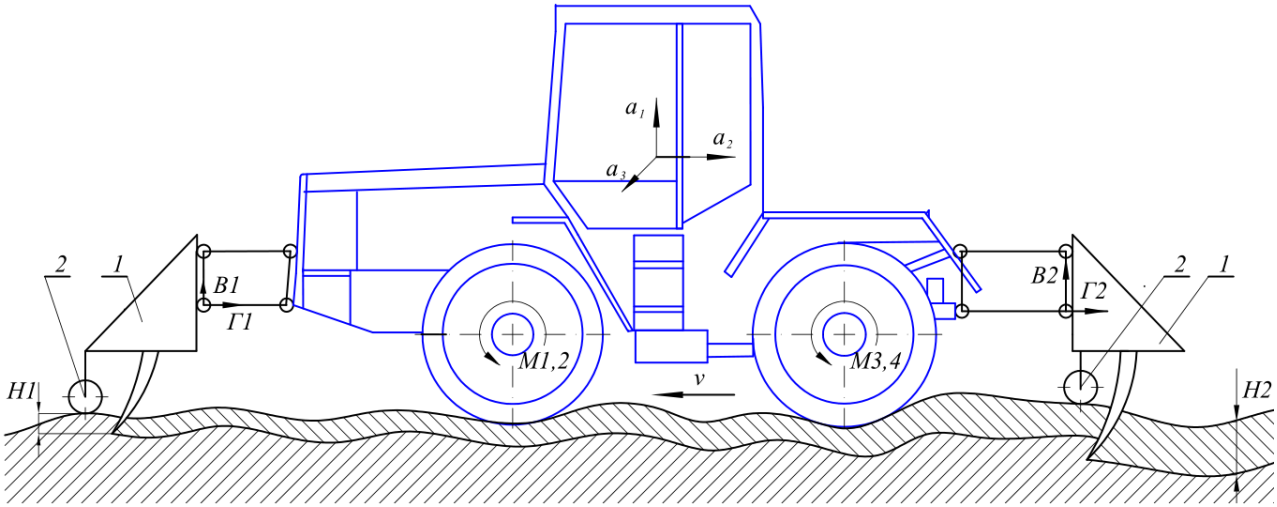


Рисунок 1. Схема комбинированного агрегата трактора 4К4б
Figure 1. Combined-block design of tractor 4K4b
Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Таблица 1

Оценки статистических характеристик нагруженности трактора 4К4б при разных способах агрегатирования

Table 1

Evaluation of statistic performance of loading of tractor 4K4b with variable building-block designs

Процесс Process	Обозначение Designation	Мат. ожид., $\bar{m}$ Expected value,	RMS value, σ	Коэф. Вар., $V = \frac{\sigma}{\bar{m}}$, % Var. factor	Макс. значение | Max. value числитель | – numerator $\gamma^*(t)$ – знаменатель | denominator					
					M1	M2	M3	M4	B2	Г2
Переднее агрегатирование, *v*=1.6 м/с | Front building-block design, *v*=1.6 m/s										
Момент на переднем левом колесе, кНм Front LH wheel torque, kNm	M1	2.88	0.67	23.2		$\frac{0.09}{0.19}$	$\frac{0.04}{0.09}$			
Момент на переднем правом колесе, кНм Front RH wheel torque, kNm	M2	1.71	0.73	42.8			$\frac{0.12}{0.20}$			
Момент на заднем левом колесе, кНм Rear LH wheel torque, kNm	M3	3.23	0.63	19.6				$\frac{0.61}{0.69}$		
Момент на заднем правом колесе, кНм Rear RH wheel torque, kNm	M4	2.68	0.67	24.9						
Горизонтальная составляющая тягового сопротивления на передней навеске, кН Horizontal component of traction resistance on front mounting, kN	Г1	9.35	2.37	25.4	$\frac{0.07}{0.13}$	$\frac{0.08}{0.11}$	$\frac{0.07}{0.10}$	$\frac{0.13}{0.09}$		
Заднее агрегатирование, *v*=1.6 м/с | Rear building-block design, *v*=1.6 m/s										
Момент на переднем левом колесе, кНм Front LH wheel torque, kNm	M1	3.55	0.67	19.0		$\frac{0.06}{0.10}$	$\frac{0.40}{0.12}$			
Момент на переднем правом колесе, кНм Front RH wheel torque, kNm	M2	2.46	0.76	30.9			$\frac{-0.21}{0.09}$			
Момент на заднем левом колесе, кНм Rear LH wheel torque, kNm	M3	3.76	1.31	34.8				$\frac{0.27}{0.65}$		
Момент на заднем правом колесе, кНм Rear RH wheel torque, kNm	M4	3.39	0.46	13.5						
Горизонтальная составляющая тягового сопротивления от орудия на задней навеске, кН Horizontal component of traction resistance on rear mounting, kN	Г2	10.63	1.42	13.5	$\frac{0.70}{0.08}$	$\frac{0.50}{0.50}$	$\frac{0.10}{0.26}$	$\frac{0.15}{0.23}$		

Комбинированное агрегатирование, *v*=1.27 м/с | Combined building-block design, *v*=1.27 m/s										
Момент на переднем левом колесе, кНм Front LH wheel torque, kNm	М1	5.06	0.34	6.7		$\frac{0.04}{0.43}$	$\frac{0.24}{0.63}$			
Момент на переднем правом колесе, кНм Front RH wheel torque, kNm	М2	3.23	0.46	14.3						
Момент на заднем левом колесе, кНм Rear LH wheel torque, kNm	М3	6.58	0.6	9.2				$\frac{0.40}{0.53}$		
Момент на заднем правом колесе, кНм Rear RH wheel torque, kNm	М4	5.48	0.62	11.3						
Вертикальная составляющая тягового сопротивления на передней навеске, кН Vertical component of traction resistance on front mounting, kN	В1	-0.35	1.10	-	$\frac{0.04}{0.17}$		$\frac{0.20}{0.60}$		$\frac{0.32}{0.70}$	$\frac{0.05}{0.28}$
Горизонтальная составляющая тягового сопротивления на передней навеске, кН Horizontal component of traction resistance on front mounting, kN	Г1	10.15	1.17	11.5	$\frac{0.04}{0.36}$		$\frac{0.07}{0.30}$		$\frac{0.03}{0.20}$	$\frac{0.03}{0.18}$
Вертикальная составляющая тягового сопротивления на задней навеске, кН Vertical component of traction resistance on rear mounting, kN	В2	0.32	1.71	-	$\frac{0.16}{0.50}$		$\frac{0.19}{0.48}$			$\frac{0.07}{0.31}$
Горизонтальная составляющая тягового сопротивления на задней навеске, кН Horizontal component of traction resistance on rear mounting, kN	Г2	12.25	0.73	5.9	$\frac{0.10}{0.41}$					

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что использование конического дифференциала приводит к равномерному распределению крутящих моментов между ведущими колёсами трактора. Результаты представленные в таблице показывают, что максимальные значения обоюдных функций для процессов крутящих моментов на ведущих задних колёсах достигают величины 0.7 – 0.8 и для каждого вида комплектования трактора при испытаниях технологическим оборудованием оказываются достаточно большими, в отличии от других вариантов экспериментального анализа исследования процессов нагружения. По рис. 3 б можно определить, что существенная корреляция находится в зоне низких частот (до 0.8 Гц). Также максимальное значение 0.6 – 0.7 на частоте до 0.5 Гц отмечены также у взаимных функций между процессами вертикальных составляющих тягового сопротивления.

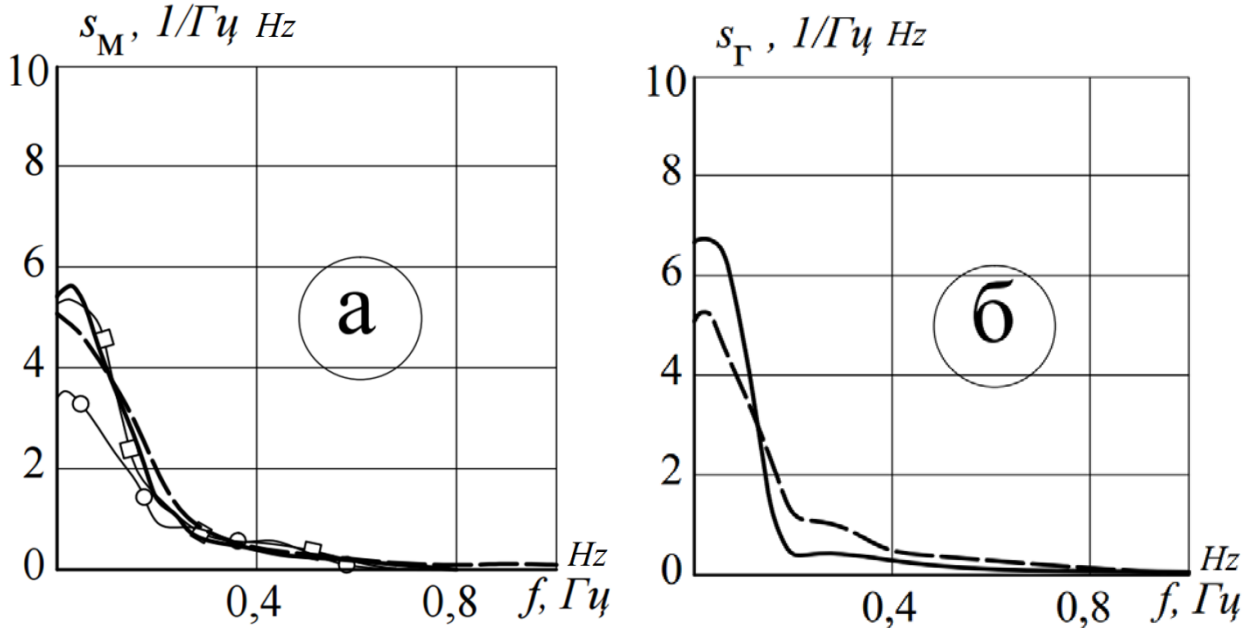


Рисунок 2. Нормированные спектральные плотности процессов нагруженности при культивации со скоростью v=1,6 м/с:
а) моментов М1 на переднем левом (—— - культиватор на задней навеске, - - - - - на передней навеске) и заднем правом (-о-о- - на задней навеске, -[]-[]- - на передней навеске) колесах; б) горизонтальной составляющей тягового сопротивления Г1: —— - от культиватора на задней навеске; - - - - на передней навеске

Figure 2. Rated spectral densities of the cultivation load processes at a speed of v=1.6 mps:
a) moments M1 on front LH (—— - cultivator is rear-mounted, - - - - - is front-mounted) and on rear RH (-o-o- - rear-mounted, -[]-[]- - front-mounted) wheels; b) horizontal component of tractive resistance Г1: —— - from rear-mounted cultivator; - - - - from front-mounted cultivator

Источник: собственный результат авторов

Source: Authors' own result

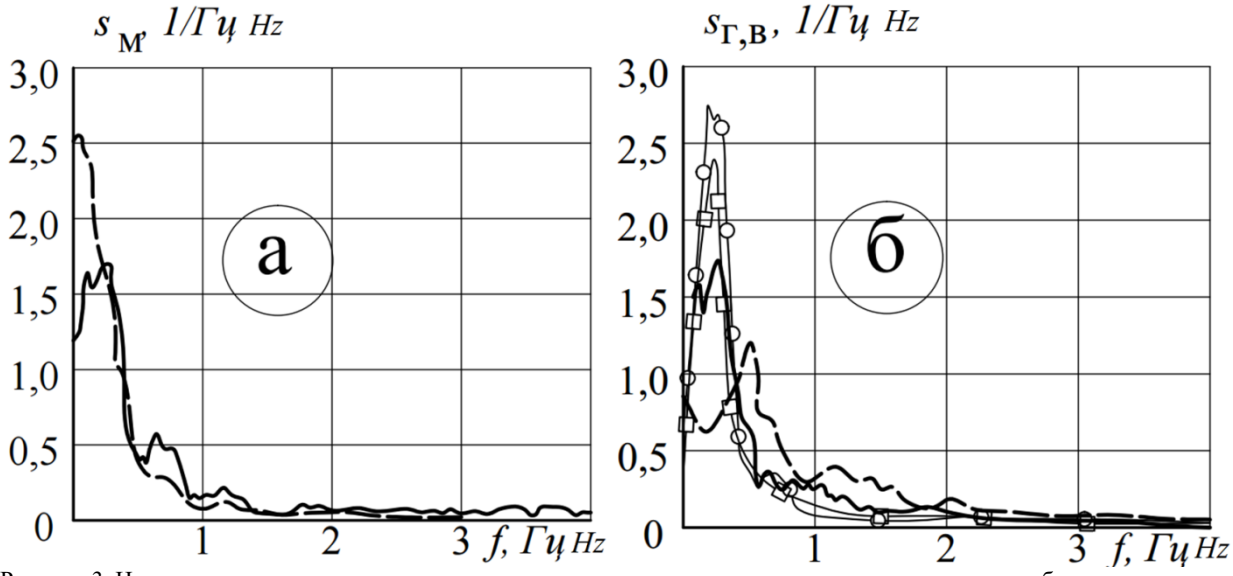


Рисунок 3. Нормированные спектральные плотности процессов нагруженности при культивации комбинированным агрегатом со скоростью v=1,27 м/с:
а) моментов М1 на переднем левом (——) и заднем правом М4 (- - -) колесах; б) горизонтальных Г1, Г2 (—— - от культиватор на задней навеске; - - - - - на передней навеске) и вертикальных в (соответственно -о-о- и -[]-[]-) составляющих тягового сопротивления

Figure 3. Rated spectral densities of loading processes at cultivation done by combined block at a speed of v=1.27 mps:
a) moments M1 on front LH (——) and rear RH M4 (- - -) wheels; b) horizontal Г1, Г2 (—— - caused by rear-mounted cultivator; - - - - - front-mounted cultivator) and vertical in (as per -o-o- and -[]-[]-) components of the tractive resistance

Источник: собственный результат авторов

Source: Authors' own result

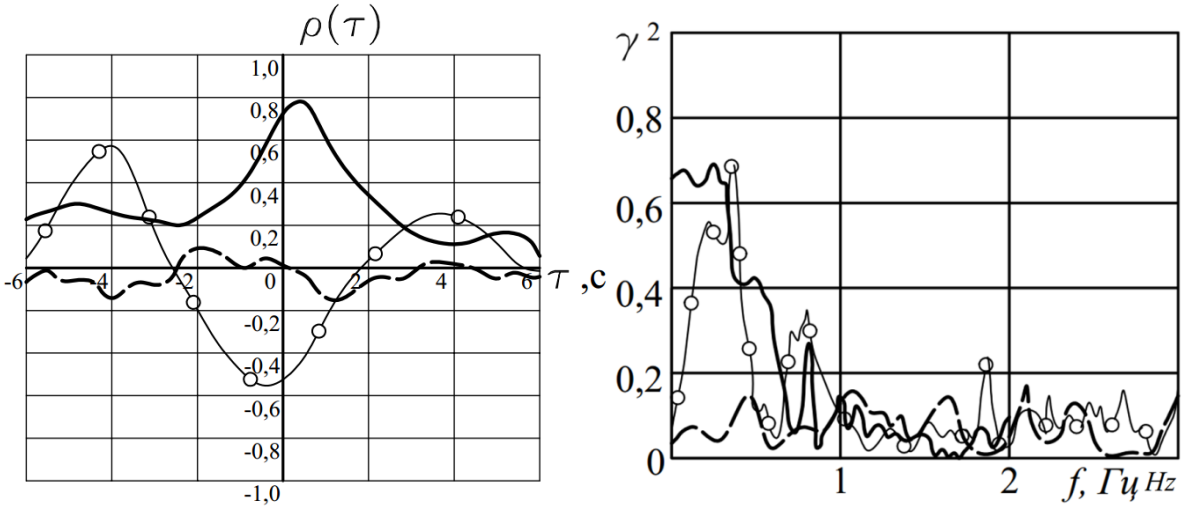


Рисунок 4. Нормированные взаимно корреляционные функции (а) и функции когерентности (б) процессов нагруженности: - - - - между моментом левого и правого задних колес при культивации со скоростью v=1,6 м/с с передним агрегатированием; —— - между горизонтальными и -o-o- - вертикальными составляющими тяговых сопротивлений при культивации со скоростью v=1,27 м/с с комбинированным агрегатированием

Figure 4. Rated cross-correlation functions (a) and coherence functions (b) of the load processes:
- - - - between moments of the LH and RH rear wheels during cultivation at a speed of v=1.6 mps at front building-block design;
—— - between horizontal and -o-o- - vertical components of the tractive resistances during cultivation at a speed of v=1.27 mps at combined building-block design

Источник: собственный результат авторов

Source: Authors' own result

На рис. 3 показано, что входным процессам в этом случае является вертикальная составляющая тягового сопротивления на задней навеске от культиватора трактора, в частности смещен в область отрицательных значений τ от оси ординат первый экстремум и что на данной составляющей возрастание значений сопровождается уменьшением вертикальной составляющей сопротивления по тяги от культиватора на передней навеске в диапазоне $\tau = \pm 2$ секунд.

Выводы

Экспериментальные исследования трактора ЛТЗ -155 показали, что при культивации в составе комбинированного агрегата суммарная горизонтальная составляющая тягового сопротивления несколько превышает (10 %) тяговый класс трактора, вертикальные составляющие тягового сопротивления от переднего и заднего культиваторов близки к нулю, а динамика процессов крутящих моментов на колесах существенно ниже, чем при культивации с только передним или традиционным агрегатированном.

Возникаемые вертикальные и горизонтальные составляющие крутящих моментов и тягового сопротивления на колесах в полосе частот, определяемой полосой пропускания динамической системы трактора (свыше 0,8 Гц), является статистически независимым шумом по отношению друг к другу.

Список литературы

1. Подрубалов М. В. Подрубалов В. К., Никитенко А. Н. Экспериментальная оценка взаимосвязи силовых факторов при работе трактора 4К4б в составе с передним и задним культиваторами. Доклады ТСХА : Сборник статей, Москва, 01 января – 31 2015 года. Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. 2016; 289-293. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41141048.

2. Голдина И. И., Несговоров А. Г. Анализ и сравнение эксплуатационные свойства тракторов Беларус и тракторов ведущих зарубежных фирм. Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2019; № 3(3): 113-123. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38096683.

3. Sokolov-Dobrev N. S., Ljashenko M. V., Shekhovtsov V. V. Research of dynamic loading in a drivetrain by means of mathematical modeling. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017; №177(1).DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012092.

4. Mederski P. S., Borz S. A., Đuka A., Lazdiņš A. Challenges in Forestry and Forest Engineering – Case Studies from Four Countries in East Europe.Croatian Journal of Forest Engineering. 2021; № 42(1): 117 – 134. DOI: 10.5552/crojfe.2021.838.

5. Подрубалов М. В., Никитенко А. Н. К вопросу о методике обработки данных эталонных сельскохозяйственных профилей пути мобильных машин. Сборник статей по итогам II международной научно-практической конференции "ГОРЯЧКИНСКИЕ ЧТЕНИЯ", посвященной 150-летию со дня рождения академика В.П. Горячкина, Москва, 18 апреля 2018 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. 2019; 82-86. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38168834

6. Косульников Р. А., Карсаков А. А., Фомин С. Д., Привалов В. А. Формирование крюковой нагруженности трактора в составе машинно-тракторного агрегата. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019; № 1(53): 371-377. DOI: http://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-01-49

7. Gapich D. S., Kosulnikov R. A., Vorobyeva N. S. Forecasting of towing indicators of tractors with 4k4 wheel arrangements. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016; №11(11): 6801-6806. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26828041

8. Kutzbach H. D., BürgerA., BöttingerS. Rolling radii and moment arm of the wheel load for pneumatic tyres. Journal of Terramechanics. 2019; №82: 13-21.DOI: https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.11.002.

9. Подрубалов М. В., Никитенко А. Н. К вопросу эксплуатационной нагруженности привода трактора 4К4б при культивации с различным агрегатированием. Доклады ТСХА: Материалы международной научной конференции, Москва, 05–07 декабря 2017 года. Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. 2018; 126-128. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34968743

10. Гапич Д. С.,Привалов В. А., Афанасьев Ю. Н. Тяговые показатели тракторов с колесной формулой 4К2 на увлажненных почвах. Научное обозрение. 2016; № 7: 95-102. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26145897

11. Kostyleva L. V., Ovchinnikov A. S., Gapich D. S. Gradient hardening chisel plow from nodular iron. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017; №12(7): 2085-2091. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29498638

12. Gnusov M., Lysych M., Druchinin D. Volumetric dynamometer units for laboratory and field testing of tillage equipment. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 1889. 052047. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/5/052047.

13. Lysych M. Study of driving dynamics of modular forestry tillage machine-tractor units in CAE SolidWorks Motion. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 595. 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012024.

References

1. Podrubalov M. V. Podrubalov V. K., Nikitenko A. N. Jeksperimental'naja ocenka vzaimosvjazi silovyh faktorov pri rabote traktora 4K4b v sostave s perednim I zadnim kul'tivatorami [Experimental evaluation of the relationship of power factors during the operation of a 4K4b tractor with front and rear cultivators.]. Doklady TSHA : Sbornik statej, Moskva, 01 janvarja – 31 2015 goda. – Moskva: Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet - MSHA im. K.A. Timirjazeva = Reports of the TLC : Collection of articles, Moscow, January 01 - 31, 2015. - Moscow: Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2016; 289-293. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41141048

2. Goldina I. I., Nesgovorov A. G. Analiz I sravnenie jekspluatacionnye svojstva traktorov Belarus I traktorov vedushhih zarubezhnyh firm [Analysis and comparison of operational properties of Belarus tractors and tractors of

leading foreign companies]. Nauchno-tehnicheskij vestnik: Tehnicheskie sistemy v APK = Scientific and Technical Bulletin: Technical systems in the agro-industrial complex. 2019; № 3(3): 113-123. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38096683

3. Sokolov-Dobrev N. S., Ljashenko M. V., Shekhovtsov V. V. Research of dynamic loading in a drivetrain by means of mathematical modeling. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017; №177(1)DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012092.

4. Mederski P. S., Borz S. A., Đuka A., Lazdiņš A. Challenges in Forestry and Forest Engineering – Case Studies from Four Countries in East Europe. Croatian Journal of Forest Engineering. 2021; № 42(1): 117 – 134. DOI: 10.5552/crojfe.2021.838.

5. Podrubalov M. V., Nikitenko A. N. K voprosu o metodike obrabotki dannyh jetalonnyh sel'skohozjajstvennyh profilej puti mobil'nyh mashin [To the question of the methodology of data processing of reference agricultural profiles of the path of mobile machines]. Sbornik statej po itogam II mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "GORJaChKINSKIE ChTENIJa", posvjashhennoj 150-letiju so dnja rozhdenija akademika V.P. Gorjachkina, Moskva, 18 aprelja 2018 goda. Moskva: Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet – MSHA im. K.A. Timirjazeva = Collection of articles on the results of the II International Scientific and Practical conference "GORYACHKIN READINGS" dedicated to the 150th anniversary of the birth of Academician V.P. Goryachkin, Moscow, April 18, 2018. - Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2019; 82-86. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38168834

6. Kosul'nikov R. A., Karsakov A. A., Fomin S. D., Privalov V. A. Formirovanie krjukovoj nagruzhennosti traktora v sostave mashinno-traktornogo agregata [Formation of the hook loading of the tractor as part of the machine-tractor unit]. Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka I vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of the Nizhnevolzhskyagrouniversitetskiy complex: Science and higher professional education. 2019; № 1(53): 371-377. (In Russ.). DOI: http://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-01-49

7. Gapich D. S., Kosulnikov R. A., Vorobyeva N. S. Forecasting of towing indicators of tractors with 4k4 wheel arrangements. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016; № 11(11): 6801-6806. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26828041

8. Kutzbach H. D., BürgerA., BöttingerS. Rolling radii and moment arm of the wheel load for pneumatic tyres. Journal of Terramechanics. 2019; №82: 13-21.DOI: https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.11.002.

9. Podrubalov M. V., Nikitenko A. N. K voprosu jekspluatacionnoj nagruzhennosti privoda traktora 4K4b pri kul'tivacii s razlichnym agregatirovaniem [To the question of the operational load of the 4K4b tractor drive during cultivation with various aggregation]. Doklady TSHA: Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Moskva, 05-07 dekabrja 2017 goda. Moskva: Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet - MSHA im. K.A. Timirjazeva = Reports of the TLC: Proceedings of the International scientific Conference, Moscow, 05-07 December 2017. - Moscow: Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2018; 126-128. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34968743

10. Gapich D. S., Privalov V. A., Afanas'ev Ju. N. Tjagovye pokazateli traktorov s kolesnoj formuloj 4K2 na uvlazhnennyh pochvah [Traction indicators of tractors with a 4K2 wheel formula on moistened soils]. Nauchnoe obozrenie = Scientific review. 2016; №7: 95-102. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26145897

11. Kostyleva L. V., Ovchinnikov A. S., Gapich D. S. Gradient hardening chisel plow from nodular iron. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017; № 12(7): 2085-2091. URL: https://www.elibrary.ru/ item.asp?id=29498638

12. Gnusov M., Lysych M., Druchinin D. Volumetric dynamometer units for laboratory and field testing of tillage equipment. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 1889. 052047. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/5/052047.

13. Lysych M. Study of driving dynamics of modular forestry tillage machine-tractor units in CAE SolidWorks Motion. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 595. 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012024.

Сведения об авторах

Подрубалов Максим Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирование объектов лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2589-5659, e-mail: podrubalov@mgul.ac.ru.

✉ *Клубничкин Евгений Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4086-1011, e-mail: klubnichkin@mgul.ac.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, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7428-0821, e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.

Information about the authors

Maxim V. Podrubalov – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Design of objects of the forest complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2589-5659, e-mail: podrubalov@mgul.ac.ru.

✉ *Evgeny E. Klubnichkin* – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4086-1011, e-mail: klubnichkin@mgul.ac.ru.

Leonid D. Bukhtoyarov – Candidate of Science (Engineering), 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: vglta-mlx@yandex.ru.

✉ – Для контактов / Corresponding author

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2021 г. Том 11 № 4 (44)

Подписано в печать 30.12.2021. Формат 60×90 1/8. Усл. печ. л. 22,75.
Уч.-изд. л. 37,67. Тираж 1000 экз. Заказ

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»
РИО УМУ ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8
Отпечатано в УОП ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». 394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific journal

2021 Vol. 11 № 4 (44)

Sent for press 30.12.2021. Format 60×90 1/8. Conv. pr. l. 22,75.
Teach. and publ. l. 37,67. Circulation 1000 copies. Order

FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov»
EPA of FSBEI HE «VSUFT». 394087, Timiryazeva st., 8, Voronezh
Printed in «VSUFT». 394087, Dokuchaeva st., 10, Voronezh