

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
2023 Том 13 № 1 (49)

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

Председатель редакционной коллегии

д.т.н., проф. М.В. Драпалюк

Главный редактор

д.т.н., проф. А.И. Новиков

Состав редакционной коллегии

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

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

д.б.н., проф. А.А. Сиринов (Россия)

д.т.н., проф. Д.Н. Афоничев (Россия)

д.т.н., проф. Е.В. Агеев (Россия)

д.т.н., проф. Л.И. Бельчинская (Россия)

д.ф.-м.н., проф. Н.Н. Матвеев (Россия)

д.б.н., проф. С.М. Матвеев (Россия)

д.б.н., доц. А.А. Гусев (Россия)

д.э.н., проф. С.С. Морковина (Россия)

д-р наук И. Ремеш (Чехия)

д.т.н., проф. А.М. Цыпук (Россия)

д-р наук, проф. П. Тылек (Польша)

д.т.н., проф. О.Н. Бурмистрова (Россия)

д.т.н., проф. И.В. Григорьев (Россия)

д.с.-х.н., проф. А.С. Манаенков (Россия)

д.б.н., проф. В.В. Рубцов (Россия)

д.т.н., проф. В.С. Сютнев (Россия)

д.б.н., проф. Н.Н. Харченко (Россия)

д-р наук, ст. науч. сотрудник

Клиссия Барбоза Мастранджело (Бразилия)

д-р наук С.В. Ребко (Беларусь)

проф. Дингуо Чжоу (КНР)

д-р наук, проф. А. Маркомини (Италия)

д-р наук, проф. В. Подразски (Чехия)

д-р наук, проф. Н. Билир (Турция)

д-р наук, проф. Я. Седячик (Словакия)

д-р наук М. Ахмади-Афзади (Иран)

д-р наук, проф. В. Иветич (Сербия)

д-р наук, проф. Кью-Сак Кэнг (Республика Корея)

д-р наук А. Монтагноли (Италия)

д-р наук Янг Пэнг (КНР)

д-р наук, проф. З. Говедар (Босния и Герцеговина)

д-р наук, проф. А. Хэлуфи (Алжир)

д-р наук, проф. К. Палагиану (Румыния)

Редактор

к.ф.н. Е.А. Прыткова

Компьютерная верстка

к.ф.н. Е.А. Прыткова

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных тех-
нологий и массовых коммуникаций.

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

Материалы настоящего журнала могут
быть воспроизведены только с пись-
менного разрешения редакционной
коллегии

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

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2023

LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific Journal

2023 Vol. 13 № 1 (49)

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

Editorial Board Head

Dr., prof. M.V. Drapalyuk

Editor-in-Chief

Dr., prof. A.I. Novikov

Members of editorial board

- Dr., prof., RAS academician K.N. Kulik (Russia)
Dr., prof. RAS corr. member A.A. Martynyuk (Russia)
Dr., prof. A.A. Sirin (Russia)
Dr., prof. D.N. Afonichev (Russia)
Dr., prof. E.V. Ageev (Russia)
Dr., prof. L.I. Belchinskaya (Russia)
Dr., prof. N.N. Matveev (Russia)
Dr., prof. S.M. Matveev (Russia)
Dr., prof. A.A. Gusev (Russia)
Dr., prof. S.S. Morkovina (Russia)
Dr. J. Remes (Czech Republic)
Dr., prof. A.M. Tsypuk (Russia)
Dr., prof. P. Tylek (Poland)
Dr., prof. O.N. Burmistrova (Russia)
Dr., prof. I.V. Grigoriev (Russia)
Dr., prof. A.S. Manaenkov (Russia)
Dr., prof. V.V. Rubtsov (Russia)
Dr., prof. V.S. Syunev (Russia)
Dr., prof. N.N. Kharchenko (Russia)
Dr. Clissia Barboza Mastrangelo (Brazil)
Dr. S.V. Rabko (Belarus)
Prof. Zhou Dingguo (PRC)
Dr., prof. A. Marcomini (Italy)
Dr., prof. V. Podrazsky (Czech Republic)
Dr., prof. N. Bilir (Turkey)
Dr., prof. J. Sedliacik (Slovakia)
Dr. M. Ahmadi-Afzadi (Iran)
Dr., prof. V. Ivetić (Serbia)
Dr., prof. Kyu-Suk Kang (Republic of Korea)
Dr. A. Montagnoli (Italy)
Dr. Yong Pang (PRC)
Dr., prof. Z. Govedar (Republic of Srpska/B&H)
Dr., prof. A. Kheloufi (Algeria)
Dr., prof. C. Palaghianu (Romania)

Editor

PhD in Philology E.A. Prytkova

Typesetting

PhD in Philology E.A. Prytkova

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

Registration certificate

PI № FS77-66384 of 14.07.2016

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

PS FSBEI HE «VSUFT»

394087, Voronezh, Timiryazeva str., 8,

telephone (473) 253-72-90,

fax (473) 253-76-51,

e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© FSBEI HE «VSUFT», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ И ЛЕС

- А.П. Царев, Р.П. Царева, В.А. Царев, Е.А. Мякотникова, Р.В. Момот.** Новые межсекционные гибриды настоящих тополей *Europulus* L. 5
- А.И. Новиков, С.В. Ребко, Т.П. Новикова, Е.П. Петрищев.** Индекс качества Диксона: связь с технологическим воздействием на лесные семена 23
- В.Т. Попова, А.А. Попова, А.К. Кондратьева, А.Н. Цепляев, Г.Я. Климчик, О.Г. Бельчина.** Динамика напочвенного покрова в биотопах сосновых лесов при фрагментации, вызванной пожарами, в условиях лесостепной зоны..... 37

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Р.Р. Байтурина, А.К. Габделхаков, Л.Р. Салимьянова.** Влияние микроклиматических городских условий на рост *Tilia cordata* Mill. (на примере г. Уфы)..... 54
- Н.В. Беляева, А.И. Новиков, Д.А. Данилов, Самер Алкинж.** Таксационная структура насаждений сосны брутильской (*Pinus brutia* TEN.) в Сирии в зависимости от орографических условий..... 67
- О.И. Григорьева, О.И. Гринько, И.В. Григорьев, Е.Г. Калита, Е.А. Тихонов.** Прогнозная модель послепожарного лесовосстановления в Иркутской области..... 85
- Р.Н. Матвеева, Ю.Е. Щерба, Н.А. Шенмайер.** Изменчивость репродуктивного развития полусибов плюсовых деревьев *Pinus sibirica* Du Tour..... 99
- Т.П. Новикова.** Оценка качества лесосеменного материала на экспериментальном участке сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при адаптивном восстановлении лесных ландшафтов..... 112
- А.Е. Осипенко, С.В. Залесов.** Разновозрастность сосновых древостоев как фактор гармонизации системы лесохозяйственных мероприятий в ленточных борах Алтайского края 129
- Славский В.А., Литовченко Д.А., Мироненко А.В., Харченко Н.Н., Титов Е.В., Говедар З.** Изучение взаимосвязи между параметрами рельефа местности и условиями произрастания насаждений в Воронежской области..... 146

CONTENTS

NATURAL SCIENCES AND FOREST

- Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Myakotnikova E.A., Momot R.V.** New intersectional hybrids of *Europulus* L..... 5
- Novikov A.I., Rebko S.V., Novikova T.P., Petrishchev E.P.** Dickson Quality Index: relation to technological impact on forest seeds..... 23
- Popova V.T., Popova A.A., Kondratieva A.K., Tseplyaev A.N., Klimchik G.Y., Belchina O.G.** Dynamics of the pine forest ground cover in the forest-steppe zone after fires..... 37

NATURE MANAGEMENT

- Baiturina R.R., Gabelkhakov A.A., Salimyanova L.R.** The influence of microclimatic urban conditions on the growth of *Tilia cordata* Mill. (Ufa city example)..... 54
- Beliaeva N.V., Novikov A.I., Danilov D.A., Samer Alkinj.** Taxation structure of Brutia pine (*Pinus brutia* TEN.) in Syria depending on orographic conditions..... 67
- O.I. Grigorieva, O.I. Grinko, I.V. Grigorev, E.G. Kalita, E.A. Tikhonov.** Predictive model of post-fire reforestation in the Irkutsk region..... 85
- Matveeva R.N., Shcherba Iu.E., Schenmaier N.A.** Variability of reproductive development of half-sibs of *Pinus sibirica* Du Tour..... 99
- Novikova T.P.** Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes..... 112
- Osipenko A.E., Zalesov S.V.** Age differences of pine stands as a factor of harmonization of the system of forest management activities in ribbon forests of the Altai Krai..... 129
- Slavskiy V.A., Litovchenko D.A., Mironenko A.V., Kharchenko N.N., Titov E.V., Govedar Z.** Study of the relationship between the parameters of the terrain and the conditions for the growth of plantings in the Voronezh region..... 146

ТЕХНОЛОГИИ.

МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. В. Посметьев, А. С. Чуйков. Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного сцепного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом..... 162

Платонов А. А. Оценка качественных и количественных характеристик нежелательной древесно-кустарниковой растительности..... 180

А.В. Попикова, А.В. Конюхов, С.К. Попиков. Оценка надежности металлоконструкций подъемно-транспортных машин лесного комплекса с учетом усталостной прочности материала..... 194

ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

К.В. Жужукин, Л.И. Бельчинская, Е.В. Томина, А.Н. Зяблов, В.Х. Йен, А.С. Чуйков. Исследование межфазного взаимодействия древесины березы с пропиловым составом..... 209

Е.М. Разиньков, В.А. Шамаев, Е.В. Кантеева, Т.Л. Ищенко, Е.В. Томина, А.С. Чуйков. Продолжительность сушки березового шпона в фанерном производстве 222

А.В. Руссу, В.А. Шамаев, Е.М. Разиньков, А.Зимелис. Исследование внутреннего трения натуральной и модифицированной пресованием древесины березы повислой (*Betula pendula* ROTN)..... 236

ЭКОЛОГИЯ

Tikhonova E.N., Gorbunova N.S., Safonova A.A., Treschevskaya E.I., Jiaolong Y., Hong Y., Chanhua M. Influence of forest belts on the total content of Pb and Cd and their exchange compounds in leached chernozems..... 257

С.И. Дегтярева, В.Д. Дорофеева, В.А. Есков, М.О. Красникова, Е.М. Олейникова, В.И. Торчик. Морфо- и феноизменчивость *Picea pungens* Engelm.: анализ пластичности вида в урбосреде Воронежа..... 268

TECHNOLOGY.

MACHINERY AND EQUIPMENT

Nikonov V. O., Posmetev V. I., Zelikov V. A., Posmetev V. V., Chuikov A. S. Optimization of the design parameters of the regenerative hitch installed in a logging vehicle with a trailer..... 162

Platonov A.A. Results of assessment of qualitative and quantitative characteristics of unwanted tree and shrubs vegetation..... 180

Popikova A.V., Konyukhov A.V., Popikov S.K. Assessment of the reliability of metal structures of lifting and transport machines of the forest complex, taking into account the fatigue strength of the material..... 194

WOOD PROCESSING.

CHEMICAL TECHNOLOGY

Zhuzhukin K.V., Belchinskaya L.I., Tomina E.V., Zyablov A.V., Wu Hoang Yen, Chuikov A.S. Investigation of interphase interaction of birch wood with impregnating composition..... 209

Razinkov E.M., Shamaev V.A., Kantieva E.V., Ishchenko T.L., Tomina E.V., Chuikov A. Duration of drying the birch veneer in the plywood production..... 222

Russu A.V., Shamaev V.A., Razinkov E.M., Ziemelis A. Internal friction investigation of the natural and compressed birch (*Betula pendula* ROTN) wood..... 236

ECOLOGY

Е.Н. Тихонова, Н.С. Горбунова, А.А. Сафонова, Э.И. Трещевская, Е. Цзяолун, Ю. Хун, М. Чаньхуа. Влияние лесополос на валовое содержание Pb и Cd и их обменные соединения в черноземах выщелоченных..... 257

Degtyareva S. I., Dorofeeva V.D., Eskov V.A., Krasnikova M.O., Oleynikova E.M., Torchik V.I. Morpho- and pheno- variability of *Picea pungens* Engelm.: analysis of the species plasticity in the Voronezh urban environment..... 268

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/1>

УДК 630*232.13



Новые межсекционные гибриды настоящих тополей *Europulus L.*

Анатолий П. Царев¹, antsa-55@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>

Раиса П. Царева¹, tsarais42@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>

Вадим А. Царев^{1,2} , vad.tsareff@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>

Елена А. Мякотникова³, myakotnikovaea@sibur.ru

Раиса В. Момот³, momotrv@sibur.ru

¹ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии», ул. Ломоносова, 105, г. Воронеж, 394087, Россия

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

³ООО «СИБУР», ул. Кржижановского, 16/1, г. Москва, 117218, Россия

В мировой практике известен пример внезапного поражения лучшего наиболее производительного тополя Италии 'I-214' ('Слава Италии'), который во многих странах Европы занимал до 35 % тополевых насаждений. Поражение листовой ржавчиной *Marsoninabrunnea* в течение нескольких лет полностью уничтожило насаждения этого сорта тополя. Эта катастрофа привела к формированию подхода, что при создании насаждений надо использовать не один, даже самый лучший сорт или клон, а несколько. Были предложения высаживать в близких экологических условиях местопрорастания не менее 30-50 разных клонов, гибридов и сортов. Такие подходы стали распространяться не только в Западной Европе, но и других странах, в том числе в Советском Союзе и России. Размножение межсекционных гибридов тополей (*Europulus L.*) производилось в производственных питомниках Воронежской и Липецкой областей. Анализ результатов гибридизации тополей (бальзамические×черные и черные×бальзамические) показал, что приживаемость гибридных сеянцев в Семилукской коллекции № 1 составила 85-100 %. Их сохранность к 2021 году снизилась до 45-74 %. По результатам многолетних наблюдений средние биометрические показатели роста по диаметру и высоте выросли от 5.9 до 14.0 см и от 8.6 до 24.4 м соответственно. Результаты исследований 16 новых межсекционных гибридов показывают, что объемы стволов в 21-летнем возрасте составили от 0,151 до 0,753 м³. В будущем планируется представить в Государственную комиссию по сортоиспытанию РФ три кандидата в сорта: 'Версия', 'Стройн' и 'Борей'.

Ключевые слова: гибридизация, размножение, сортоиспытание, тополь, биометрические показатели, государственная регистрация сортов

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: Авторы благодарят сотрудников Всероссийского научно-исследовательского института лесной генетики, селекции и биотехнологии, Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, принимавших участие в проведении работ по гибридизации и размножению новых гибридов тополей, а также работников производственных лесных предприятий за помощь в создании коллекционных полевых испытательных объектов тополей и уходе за ними.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Новые межсекционные гибриды настоящих тополей *Europulus* L. / А. П. Царев, Р. П. Царева, В. А. Царев, Е. А. Мякотникова, Р. В. Момот // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 5–22. – Библиогр.: с. 17–21 (24назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/1>


Поступила 11.03.2023. Пересмотрена 07.04.2023. Принята 09.04.2023. Опубликовано онлайн 15.05.2023.


Article


New intersectional hybrids of *Europulus* L.

Anatoly P. Tsarev¹, antsa-55@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>

Raisa P. Tsareva¹, tsarais42@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>

Vadim A. Tsarev^{1,2} ✉, vad.tsareff@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>

Elena A. Myakotnikova³, myakotnikovaea@sibur.ru 

Raisa V. Momot³, momotrv@sibur.ru 

¹All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Lomonosov str., 105, Voronezh, 394087, Russian Federation

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

³'SIBUR' LLC, Krzhizhanovskiy str., 16/1, Moscow, 117218, Russian Federation

Abstract

In world practice, there is an example of a sudden defeat of the best most productive poplar in Italy 'I-214' ('Glory of Italy'), which in many European countries occupied up to 35% of poplar plantations. The defeat of leaf rust *Marsonina brunnea* for several years completely destroyed the plantings of this variety of poplar. This catastrophe led to the formation of an approach that when creating plantings, it is necessary to use not one, even the best variety or clone, but several. There were proposals to plant at least 30-50 different clones, hybrids and varieties in close ecological conditions of the growing place. Such approaches began to spread not only in Western Europe, but also in other countries, including the Soviet Union and Russia. Reproduction of intersectional hybrids of poplars (*Europulus* L.) was carried out in production nurseries of the Voronezh and Lipetsk regions. Analysis of the results of hybridization of poplars (balsamic× black and black× balsamic) showed that the survival rate of hybrid seedlings in the Semiluk collection No. 1 was (85-100%). Their safety by the age of 21 has decreased to 45-74%. According to the results of long-term observations, the average biometric growth indicators in height and diameter increased from 5.9 to 14.0 cm and from 8.6 to 24.4 m, respectively. The results of studies of 16 new intersectional hybrids show that the trunk volumes at the age of 21 ranged from 0.151 to 0.753 m³. In the future, it is planned to submit three candidates for varieties to the State Commission for Variety Testing of the Russian Federation: 'Versiya', 'Stroyn' and 'Borey'.

Keywords: hybridization, reproduction, variety testing, poplar, biometric indicators, state registration of varieties

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: The authors thank the staff of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology and the Voronezh State University of Forestry and Technology named after G.F. Morozov, who participated in the hybridization and reproduction of new poplar hybrids, as well as employees of industrial forest enterprises for their assistance in creating collection field test facilities of poplars and treatment for them.

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

For citation: Tsarev A. P., Tsareva R. P., Tsarev V. A., Myakotnikova E. A., Momot R. V. (2023). New intersectional hybrids of *Eupopulus L. Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 5-22 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/1>.

Received 11.03.2023. **Revised** 07.04.2023. **Accepted** 09.04.2023. **Published online** 15.05.2023.

Введение

Тополя являются одними из наиболее быстрорастущих древесных растений умеренного климата. И благодаря своей скорости роста, а также способности к вегетативному размножению, сохраняющей все генетические особенности материнских деревьев, тополя являются объектом пристального и первоочередного внимания лесных генетиков и селекционеров всего мира. Это реализовалось в создании международной тополевой комиссии (International Poplar Commission) в рамках ФАО, которая уже более 75 лет координирует исследования по генетике, селекции, разведению и использованию тополей и других быстрорастущих пород [1-3 и др.].

В систематике выделяют секции осин, белых, черных, бальзамических и туранговых тополей и насчитывают по разным источникам как минимум более 30 различных видов [4-6 и др.].

В зависимости от климатических и почвенно-экологических условий местопроизрастания в разных зонах отдается предпочтение представителям тех или иных секций [5-8].

Кроме того, в начале 20-го века в разных странах (сначала в Великобритании, затем в США, а потом и в других государствах) были начаты гибридные работы с целью соединить лучшие качества, которыми располагают разные виды тополей. Пионером гибридных работ считается исследователь А. Ненгу, который в 1912 году в Великобритании синтезировал гибрид *P. generosa* Ненгу, скрестив *P. trichocarpa* Hooker × *P. angulata* Ait. К середине XX века в мире (без СССР) насчитывалось 83 гибрида тополей. К настоящему времени число гибридов в мире увеличилось многократно [2, 9, 10].

В Советском Союзе и России также было выведено много гибридов [11 и др.]. При этом селекционеры стремились получить у гибридного

потомства оптимальное сочетание хозяйственно-ценных признаков материнских растений, в частности, быстрый рост и зимостойкость бальзамических тополей в ювенильном возрасте с быстрым ростом в более зрелом возрасте у черных [11-15].

Кроме того, гибридные работы проводились с целью получения у новых гибридов дополнительных хозяйственно-ценных свойств. Таких как прямизна стволов, пирамидальность кроны, плотность древесины и др., а также повышения устойчивости растений к энтомофитопатогенам и фитоболезням, особенно после внезапного поражения лучшего и наиболее производительного тополя Италии 'I-214' ('Слава Италии'), который во многих странах Европы занимал до 35 % тополевых насаждений [16, 17].

Поражение листовой ржавчиной *Marsonina brunnea* в течение нескольких лет полностью уничтожило насаждения этого сорта тополя. Эта катастрофа привела к мысли, что при создании насаждений надо использовать не один, даже самый лучший сорт или клон, а несколько. В научной литературе появились предложения, что во избежание подобных катастроф необходимо в близких экологических условиях местопроизрастания высаживать 30-50 разных клонов, гибридов и сортов.

В настоящей работе приводятся данные по результатам гибридизации между бальзамическими и черными тополями и наоборот. Многолетние исследования позволили получить определенные положительные результаты.

Цель представленной работы заключалась в анализе результатов межсекционной гибридизации настоящих тополей и в отборе новых кандидатов в сорта.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Объектами исследований были Семилукская коллекция новых гибридов тополя № 1, созданная в

1977 г. в Семилукском районе Воронежской области, а также коллекционно-маточные плантации (КМП), созданные на территории лесопаркового участка (ЛПУ) ФГБУ «ВНИИЛГИСбиотех» (2016 г., г. Воронеж), в Куликовском лесхозе Липецкого управления лесного хозяйства (2019-2020 гг., с. Кулики Усманского района Липецкой области) и на землях ООО «Объединенные питомники» (2022 г., с. Приволье Семилукского района Воронежской области).

Сбор данных

При межсекционных скрещиваниях в качестве материнских форм были взяты черные (дельтовидный и 'Пионер') и бальзамические (бальзамический и волосистоплодный) тополя. В качестве отцовских форм в скрещиваниях использовались черный тополь 'Пирамидально-осоконовый Камышинский' ('ПОК'), тополь бальзамический и межсекционный гибрид 'Э.с.-38' ('Элитный сеянец № 38').

Проведено 5 межсекционных вариантов скрещиваний: дельтовидный×бальзамический (семья 75.11), бальзамический×'ПОК' (семья 75.33), 'Пионер'× бальзамический (семья 75.41), волосистоплодный×'Э.с.-38' (семья 75.52). Всего было выращено несколько сотен гибридных сеянцев, из них отобрано 216 экземпляров, которые перенесены на постоянное местопроизрастание в Семилукскую коллекцию гибридов № 1 для последующего сортоизучения и первичного сортоиспытания.

Почва – чернозем обыкновенный суглинистый. Размещение гибридов на коллекции 5×5 м. На участке периодически проводились замеры высот и окружностей стволов. Высоты первые 5 лет измерялись с помощью мерного шеста, а в последующие годы высотомером *Blume Lisse*. Окружности стволов переводились в диаметры. Расчет объемов стволов осуществлялся по формуле:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{Hf}{10\,000} \quad (2.1)$$

где V – объем ствола, м³;

D – диаметр на высоте 1,3 м, см;

H – высота дерева, м;

f – видовое число, или форм-фактор; $f = V/V'$,

где V' – это цилиндр, основанием которого является сечение ствола дерева на высоте 1,3 м, а высота равна

высоте дерева; f для тополей в среднем составляет 0,39.

Анализ данных

В соответствии с директивой Совета 1999/105/ЕС статистическим контролем для сравнения могут служить средние характеристики тестируемой совокупности растений. В каждой семье были отобраны деревья, которые превышали соответствующее среднее значение тестируемых гибридных семей.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены показатели приживаемости и динамика сохранности межсекционных гибридных семей тополя на Семилукской коллекции № 1.

Из данных табл. 1 видно, что приживаемость сеянцев была высокой и составляла в среднем 93 %. Изучение динамики сохранности испытываемых гибридных семей показало, что плановая сохранность, принятая Управлением лесного хозяйства по Воронежской области равной 70 %, наблюдалась в основном до 17 лет. Исключение составила семья № 75.52 (волосистоплодный × 'Э.с.-38'). Сохранность ее потомства высокой (75-83 %) была до 7-летнего возраста. В 8 лет она снизилась до 58 %, а в 10-летнем возрасте – до 50 %, какой и оставалась до 21-летнего возраста. А у семьи № 75.41 ('Пионер'× бальзамический) сохранность гибридов оставалась высокой в течение всех лет наблюдений и в 21 год она составляла 74 % (рис. 1).

Динамика роста анализируемых гибридных семей представлена в табл. 2 и 3. Из данных табл. 2 видно, что в первые годы роста лучшие показатели по высоте, превышающие контроль, были у потомств гибридных семей 75.11, 75.41 и 75.52. И лидерами они оставались до 9 лет. В 9 лет эти семьи имели среднюю высоту 7,9-9,0 м, у контроля в этом возрасте она составила 7,8 м. В 10-летнем возрасте в тройку лидеров по высоте вошла семья 75.33, а семья 75.11 стала отставать и переместилась на 4-е место. Такое распределение рангов по высоте сохранялось до конца наблюдений, т.е. до 21 года. Средняя высота лидирующей тройки в 21 год составляла 14,0-16,7 м (рис. 2).

По диаметру, также как и по высоте, первыми были семьи 75.11, 75.41 и 75.52. В 10 лет в тройку лучших вошла семья 75.52, а семья 75.11 перемести-

ласть на 4-е место. Сложившаяся дифференциация сохранялась до конца наблюдений. Средний диаметр лидирующей группы в 21 год варьировал от 24 до 32 см (рис. 3).

Дифференциация по росту наблюдалась не только между семьями, но и внутри семей. В группу перспективных по энергии роста были отобраны 16 гибридов, перечень которых с динамикой их роста представлены в табл. 4.

Из семьи 75.11 (дельтовидный × бальзамический) отобрано 4 гибрида, которые в 18 лет имели

высоту 11,7-13,5 м (у контроля – 12,0 м) и диаметр – 18,5-25,8 см (у контроля – 19,0 см). Из семьи 75.33 (бальзамический × ‘ПОК’) отобрано также 4 гибрида с высотой 14,7-16,8 м, диаметром 27,7-30,3 см (у контроля соответственно 13,5 м и 22,0 см). Сложные гибриды этой семьи получены при опылении пыльцой тополя ‘Пирамидально-осокоревого Камышинского’, который, в свою очередь, получен при скрещивании тополя пирамидального с тополем черным (г. Волгоград, ВНИАЛМИ, автор гибрида – А.В. Альбенский).

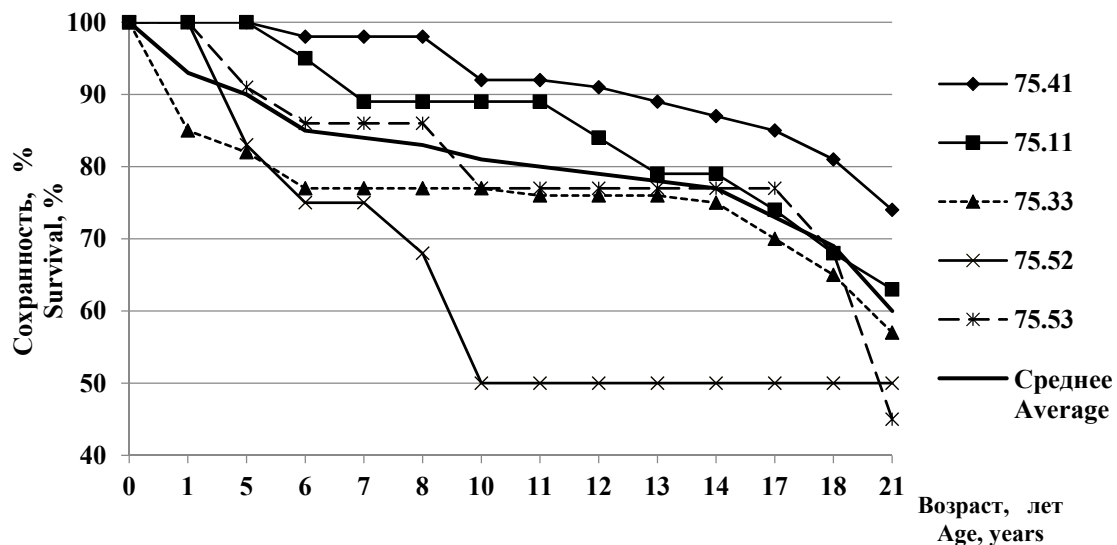


Рисунок 1. Динамика сохранности гибридных семей тополя, произрастающих на Семилукской коллекции № 1 (%)
Figure 1. Dynamics of survival of hybrid poplar families growing at the Semiluky collection No. 1 (%)

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

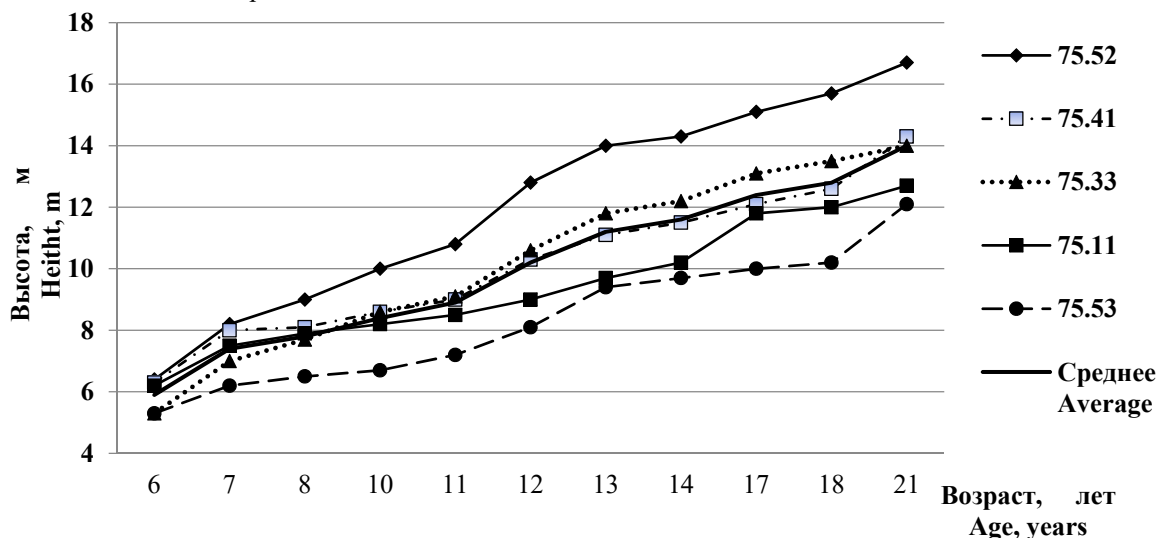


Рисунок 2. Динамика роста гибридных семей тополя по высоте (м) на Семилукской коллекции № 1
Figure 2. Dynamics of growth of hybrid poplar families in height (m) at the Semiluky collection No. 1

Источник: собственная композиция авторов
Source: authors' composition

Таблица 1

Приживаемость и динамика сохранности потомств гибридных семей тополя на Семилукской коллекции № 1

Table 1

Dynamics of survival of the offspring of hybrid poplar families at the Semiluky collection No. 1

Шифр гибридной семьи Inventory number of the hybrid families	Варианты скрещиваний Variants of crosses	Высажено сеянцев, шт. Number of planted seedlings, pcs.	Приживаемость, шт. % Rootage rate, pcs. %	Динамика сохранности по годам наблюдений, шт. % в возрасте (лет) Survival dynamics by years of observation, pcs. % at the age (years)												
				5	6	7	8	10	11	12	13	14	17	18	21	
75.11	дельтовид. × бальзам. <i>P. deltoides</i> × <i>P. balsam.</i>	19	19/100	18/95	17/89	17/89	17/89	17/89	17/89	17/89	16/84	15/79	15/79	14/74	13/68	12/63
75.33	бальзамич. × ПЛОК** <i>P. balsam.</i> × ПЛОК*	110	94/85	85/77	85/77	85/77	85/77	85/77	85/77	84/76	84/76	84/76	83/75	77/70	72/65	63/57
75.41	Пионер × бальзам. ‘Pioneer’ × <i>P. balsam.</i>	53	53/100	52/98	52/98	52/98	52/98	49/92	49/92	49/92	48/91	47/89	46/87	45/85	43/81	39/74
75.52	волосист. × ‘Э.с.-38’ <i>P. trichocarpa</i> × ‘E.s.-38’	12	12/100	9/75	9/75	7/58	7/58	6/50	6/50	6/50	6/50	6/50	6/50	6/50	6/50	6/50
75.53	волосист. × ПЛОК** <i>P. trichocarpa</i> × ПЛОК*	22	22/100	19/86	19/86	19/86	19/86	17/77	17/77	17/77	17/77	17/77	17/77	17/77	15/68	10/45
Итого и среднее: Total and average:		216	200/93	183/85	182/84	180/83	174/81	173/80	171/79	169/78	167/77	158/73	149/69	130/60		

*‘ПЛОК’ – ‘Пирамидально-осокоревый Камышинский’

‘РОК’ – ‘Pyramidal-osokorevy Kamushnitsky’

Источник: собственные вычисления авторов

Таблица 2
Динамика роста потомств гибридных семей тополя на Семилукской коллекции № 1, полученных от межсекционных скрещиваний (по высоте)

Table 2
Dynamics of growth of offspring of hybrid poplar families at the Semiluky collection No. 1, obtained from intersecational crosses (in height)

Шифр гибридной семьи Inventory number of the hybrid families	Варианты скрещиваний Variants of crosses	Динамика роста в высоту по годам наблюдений, м в возрасте (лет) Growth dynamics in height by years of observation, m at the age (years)										
		6	7	8	10	11	12	13	14	17	18	21
75.11	дельтовидный × бальзамический <i>P. deltoides</i> × <i>P. balsamifera</i>	6,2	7,5	7,9	8,2	8,5	9,0	9,7	10,2	11,8	12,0	12,7
75.33	бальзамический × ПОК** <i>P. balsamifera</i> × РОК'	5,3	7,0	7,7	8,6	9,1	10,6	11,8	12,2	13,1	13,5	14,0
75.41	'Пионер' × бальзамический 'Рюлеет' × <i>P. balsamifera</i>	6,3	8,0	8,1	8,6	9,0	10,3	11,1	11,5	12,1	12,6	14,3
75.52	волосистоплодный × 'Эс-38' <i>P. trichocarpa</i> × 'E.s.-38'	6,4	8,2	9,0	10,0	10,8	12,8	14,0	14,3	15,1	15,7	16,7
75.53	волосистоплодный × ПОК** <i>P. trichocarpa</i> × РОК'	5,3	6,2	6,5	6,7	7,2	8,1	9,4	9,7	10,0	10,2	12,1
Итого и среднее: Total (control):		5,9	7,4	7,8	8,4	8,9	10,2	11,2	11,6	12,4	12,8	14,0

*'ПОК' – 'Пирамидально-осокоревый Камышинский'

'РОК' – 'Рутамидально-осокоревый Камышинский'

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 3

Динамика роста потомств гибридных семей тополя на Семилукской коллекции № 1, полученных от межсекционных скрещиваний (по диаметру)

Table 3

Dynamics of growth of offspring of hybrid poplar families at the Semiluky collection No. 1, obtained from intersecional crosses (in diameters)

Шифр гибридной семьи Inventory number of the hybrid families	Варианты скрещиваний Variants of crosses	Динамика роста по диаметру, см в возрасте (лет) Growth dynamics in diameter by years of observation, cm at the age (years)										
		6	7	8	10	11	12	13	14	17	18	21
75.11	дельтовидный×бальзамический <i>P. deltoides</i> × <i>P. balsamifera</i>	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
75.33	бальзамический×'ПОК' <i>P. balsamifera</i> × 'POK'	7	10	11	14	15	16	17	18	21	22	24
75.41	'Пионер'× бальзамический 'Pioneer' × <i>P. balsamifera</i>	9	12	13	15	16	17	18	19	21	22	25
75.52	волосистоплодный × Э.с.-38' <i>P. trichocarpa</i> × E.s.-38'	10	13	15	19	20	21	22	25	29	30	32
75.53	волосистоплодный×'ПОК' <i>P. trichocarpa</i> × 'POK'	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	21
Итого и среднее: Total (control):		8,6	11,0	12,2	14,4	15,4	16,4	17,4	18,8	21,0	22,0	24,4

*'ПОК' – 'Пирамидально-осокоревый Камышинский'

'РОК' – 'Рутамидально-осокоревый Камышинский'

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

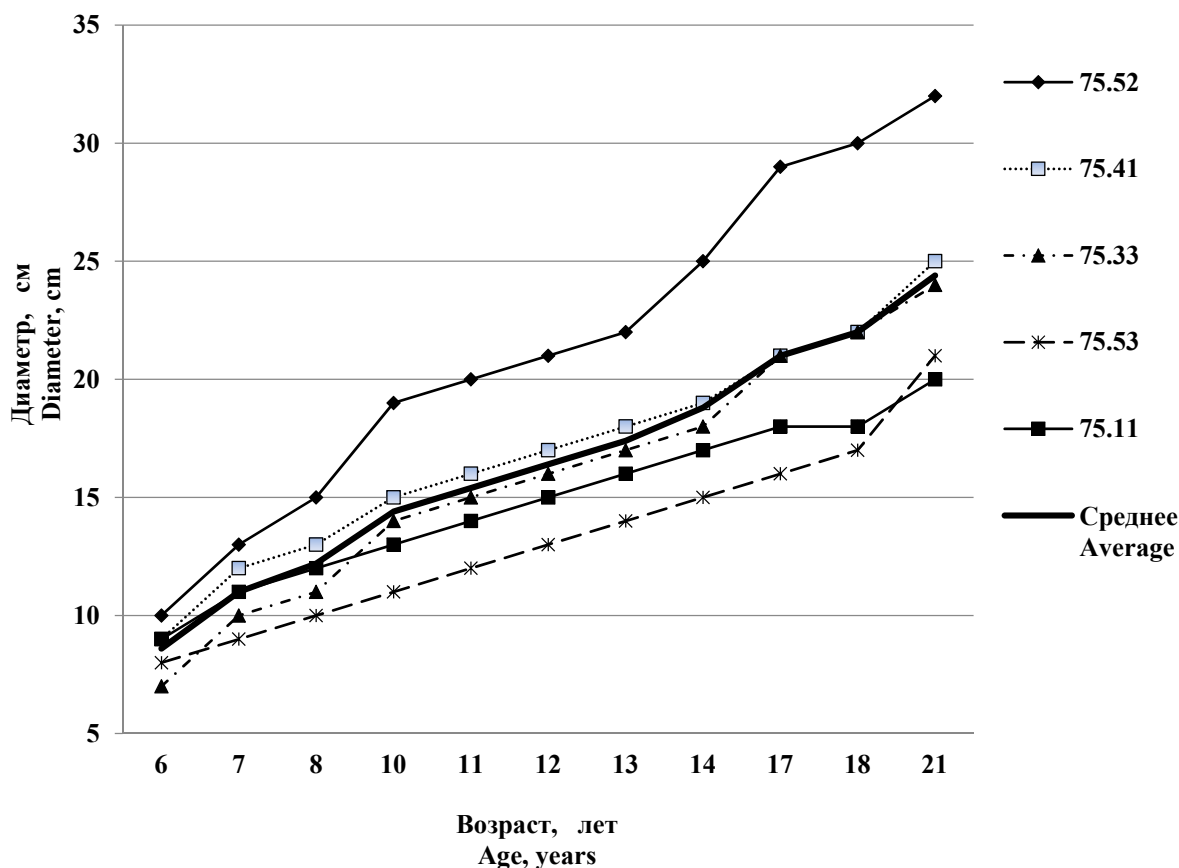


Рисунок 3. Динамика роста гибридных семей тополя по диаметру (см) на Семилукской коллекции № 1

Figure 3. Dynamics of growth of hybrid poplar families in diameter (cm) at the Semiluky collection No. 1

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Несколько больше (7 гибридов) отобрано в перспективную группу из семьи 75.41 (т. 'Пионер' × бальзамический). Тополь 'Пионер' получен А. С. Яблоковым от скрещивания т. черного пирамидального с т. черным с раскидистой формой кроны. Перспективные гибриды семьи 75.41 в 18 лет имели высоту 13,8-18,0 м, диаметр – 22,6-30,0 см. У контроля средняя высота в этом возрасте была 12,6 м, диаметр 22,0 см.

В семье 75.52 (волосистоплодный × Э.с.-38) отобран один гибрид с показателями роста в 18 лет по высоте 17,2 м и по диаметру 32,5 см. Средние значения по семье (контроль) составляли в этом возрасте 15,7 м и 30,0 см соответственно. Потомство этой семьи состоит также из сложных гибридов, т.к. отцовская форма (т. 'Э.с.-38') получена М. М. Версиным (ВГЛТУ) при скрещивании тополя дельтовидного (из секции черных тополей) с тополем баль-

замическим и имеет следующую формулу: волосистоплодный × (дельтовидный × бальзамический).

Кроме того, в табл. 4 представлены данные по объемам стволов. Наибольшие объемы стволов в 21-летнем возрасте отмечены у гибридов 'Стройн', 'Борей', 'Передел', 'Версия', 'Арктур', 'Былина' и гибрида 14.13 (0,506-0,753 м³).

Среди перечисленных новых гибридов отобраны три гибрида – кандидата в сорта. Это два сложных мужских гибрида из семьи 75.33 (бальзамический × 'ПОК') – 'Стройн' и 'Борей', а также женский сложный гибрид из семьи 75.41 ('Пионер' × бальзамический) – 'Версия' с объемом стволов от 0,506 до 0,580 м³. Эти гибриды в настоящее время проходят стадию размножения с целью дальнейшей их передачи в Госсортокмиссию РФ для

Таблица 4

Table 4

Динамика роста отобранных гибридов тополей, произрастающих на Семилукской коллекции № 1

Growth dynamics of selected poplar hybrids growing at the Semiluky collection No. 1

№№ п/п Ordinal No	Шифр семьи Inven- tory number of the families	Наименование гибрида Hybrid names	Родители Parent trees	Шифр гибрида Inven- tory number of the hybrid	Динамика роста перспективных гибридов по высоте (H), диаметру (D) и объему ствола (V) Growth dynamics of promising hybrids in height (H), diameter (D) and trunk volume (V)												Пол			
					6 лет			10 лет			14 лет			18 лет				21 год		
					H, м	D, см	V, м³	H, м	D, см	V, м³	H, м	D, см	V, м³	H, м	D, см	V, м³		H, м	D, см	V, м³
1		'Руслан' 'Ruslan'	дельтовидн. × бальзамический <i>P. deltoides</i> × <i>P. balsamifera</i>	29-04	7,5	11,2	9,1	15,3	10,6	17,8	11,7	19,7	12,4	20,1	0,153	♂				
2	75.11	'Балиста' 'Balista'		29-11	7,5	11,6	10,0	15,6	12,0	17,5	13,5	18,5	13,8	18,9	0,151	♀				
3		б/название untitled		29-07	7,0	10,0	10,6	15,0	11,8	20,1	12,7	22,3	13,1	23,9	0,229	♀				
4		б/название untitled		29-14	6,6	9,7	9,4	17,5	10,5	22,0	12,6	25,8	13,1	26,8	0,288	♀				
Среднее по семье (контроль) Family average (control):					6,2	9,0	8,2	13,0	10,2	17,0	12,0	19,0	12,7	20,0	0,156	-				
5		'Стройн' 'Stroyn'		11-05	8,8	12,2	12,1	21,3	15,5	27,0	16,7	30,3	16,9	32,0	0,530	♂				
6	75.33	'Борея' 'Borey'	бальзамиче- ский × 'ПОК'*	13-01	7,4	10,2	11,0	17,8	15,5	23,0	16,7	27,7	17,6	32,8	0,580	♂				
7		б/название untitled		14-13	6,5	10,1	10,8	19,4	15,0	29,0	16,8	36,4	17,4	37,6	0,753	♀				
8		б/название untitled		15-13	6,4	11,8	9,5	20,4	13,3	26,8	14,7	29,6	15,2	31,2	0,453	♀				
Среднее по семье (контроль) Family average (control):					5,3	7,0	8,6	14,0	12,2	18,0	13,5	22,0	14,0	24,0	0,247	-				
9		'Передел' 'Peredel'		22-02	9,1	17,5	10,5	22,9	13,6	27,4	14,1	30,0	16,2	33,4	0,554	♀				
10		'Адита' 'Addita'		22-05	8,4	14,1	10,4	20,1	13,1	24,8	14,0	27,0	15,3	31,2	0,456	♀				
11		'Версия' 'Versiya'	'Пионер' × бальзамиче- ский	23-07	9,3	15,4	12,0	20,5	15,7	25,2	16,7	27,4	18,0	30,3	0,506	♂				
12	75.41	'Арктур' 'Arktur'	'Пионер' × <i>P. balsamifera</i>	22-10	6,2	10,5	9,5	16,1	12,0	20,1	13,8	23,6	15,7	32,5	0,508	♂				
13		'Садко' 'Sadko'		23-06	7,8	11,7	9,7	19,1	13,6	22,9	14,0	25,0	15,0	27,7	0,353	♂				
14		'Эрда' 'Erda'		25-04	9,0	13,3	11,0	20,4	13,6	26,1	16,0	28,3	17,0	30,3	0,478	♀				
15		'Арта' 'Arta'		25-05	8,5	11,5	10,0	17,2	12,2	20,4	14,3	22,6	15,7	23,9	0,275	♀				
Среднее по семье (контроль) Family average (control):					6,3	9,0	8,6	15,0	11,5	19,0	12,6	22,0	14,3	25,0	0,274	-				
16	75.52	'Былина' 'Bylina'	волосистошолодный × 'Э.с.-38' <i>P. trichostoma</i> × 'E.s.-38'	36-02	7,0	11,5	11,0	21,0	16,2	28,0	17,2	32,5	18,3	34,7	0,675	♀				
Среднее по семье (контроль) Family average (control):					6,4	10,0	10,0	19,0	14,3	25,0	15,7	30,0	16,7	32,0	0,524	-				

Примечание: 'ПОК' – 'Пирамидально-осокоревый Камышинский'

Note: 'POK' – 'Pyramidal-osokorev Kamushinsky'

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

патентования селекционного достижения и присвоения им статуса “сорт”. Из размноженных гибридов создано укоренительное отделение для выращивания укорененного посадочного материала с целью создания испытательного участка и проведения сортоизучения и сортоиспытания новых генотипов. В табл. 5 представлен материал по укореняемости стеблевых черенков новых гибридов тополя –

кандидатов в сорта, высаженных в разных регионах Воронежской и Липецкой областей: в с. Приволье Семилукского района Воронежской области (на землях ООО “Объединенные питомники”), в Куликовском лесхозе Липецкого управления лесного хозяйства (Усманский район Липецкой области) и в лесопарковом участке ФГБУ “ВНИИЛГИСБиотех” (г. Воронеж).

Таблица 5

Укореняемость стеблевых черенков новых гибридов тополя – кандидатов в сорта и средняя высота 1-летних саженцев в различных регионах исследования

Table 5

Rootability of stem cuttings of new poplar hybrids – candidates for varieties and the average height of 1-year-old seedlings in different regions of the study

Кандидаты сорта Candidates for variety	Районы испытания Test areas								
	ЛПУ “ВНИИЛГИСБиотех” Forest-Park Area of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology			Куликовский лесхоз Kulikovskiy forestry			с. Приволье Privol’e village		
	высажено, шт. Initial-lyplanted, pcs.	укореняемость, % rootage, %	средняя высота, см average height, cm	высажено, шт. Initial-lyplanted, pcs.	укореняемость, % rootage, %	средняя высота, см average height, cm	высажено, шт. Initial-lyplanted, pcs.	укореняемость, % rootage, %	средняя высота, см average height, cm
‘Версия’ ‘Versiya’	45	82	64	196	89	84	120	82	89
‘Борей’ ‘Borey’	92	82	61	139	81	72	86	78	80
‘Стройн’ ‘Stroyn’	28	89	77	50	96	70	25	76	69
Почва Soil	серая лесная супесчаная gray forest sandy loam			чернозем обыкновенный среднесуглинистый ordinary medium loamy chernozem					

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Из данных табл. 5 видно, что укореняемость стеблевых черенков испытываемых тополей была высокая. У тополя ‘Версия’ она была равна 82-89 %, у ‘Борей’ – 78-82 %, у ‘Стройна’ – 76-96 %. Причем укореняемость в Куликовском лесхозе в Усманском районе Липецкой области на черноземе обыкновенном была самой высокой (81-96 %).

Средняя высота 1-летних укорененных саженцев варьировала от 61 до 89 см. Наибольшей она была у ‘Версии’ и ‘Борей’ в Куликовском

лесхозе и в питомнике в с. Приволье Семилукского района Воронежской области (72-84 см), наименьшая – у т. ‘Стройна’ (69-70 см).

По данным чешских исследователей [18], сохранность шести отобранных клонов гибридных тополей (*P. maximowiczii* × *P. berolinensis*) на миниротационных плантациях (размещение 2,6×0,7 м, 49°32'N, 16°15'E) в 6-летнем возрасте перед их срезкой на биомассу составляла от 59,1 % у гибрида *P. trichocarpa* × *P. koreana* (*P. trichocarpa* × *P.*

deltoides) до 73,1 % угибрида *P. nigra* × *P. maximowiczii*. Сохранность местного тополя черного в этом же возрасте составила 36,9 %. Средний диаметр 6-летних гибридов варьировал от 5,9 см (*P. nigra*) до 10,1 см у гибрида *P. trichocarpa* × *P. koreana* (cf. *P. trichocarpa* × *P. deltoides*). Средняя высота 5-ти из 6-ти испытываемых гибридов превышала 8 м, а у 3-х гибридов была выше 10 м. Сохранность наших гибридов в 5-летнем возрасте варьировала от 82 до 100 % и в среднем составила 90 % (см. табл. 1), что значительно превышает данные чешских исследований. Соответствующие средние показатели отобранных нами гибридов в этом же возрасте существенно превышают результаты чешских исследователей (см. табл. 4). Возможно, это связано с большей площадью питания наших гибридов, высаженных с размещением 5×5 м.

В опыте американских исследователей с тремя уровнями искусственного засоления [19] для 8-ми гибридов тополя после 4 лет испытаний 5 гибридов (3 гибрида *P. deltoides* Bart. ex Marsh. × *P. nigra* L., *P. 'Robusta'* и один гибрид *P. nigra* × *P. maximowichii* A. Henry) при низком уровне засоления (0,1-3,9 dS m⁻¹) демонстрировали высокую сохранность – от 87 до 100 %. Средняя высота этих гибридов после 4-го сезона испытаний варьировала от 2,7 до 3,4 м (размещение 3×3 м). Сохранность наших гибридов в 5-летнем возрасте варьировала от 82 до 100 % и в среднем составила 90 % (см. табл. 1). Средняя высота наших гибридов в 6-летнем возрасте составила 6,4-9,3 м (размещение 5×5 м) (см. табл. 4).

Китайскими исследователями из Нанкинского лесного университета [20] в 2021 г. были представлены результаты 24-х летних полевых испытаний 104-х интродуцированных из южных штатов (Миссисипи, Луизиана, Техас) США (*P. deltoides* Bartr. ex Marsh.), а также тополя 'I-69' (*P. deltoides* Bartr. ex Marsh. cv. 'Lux') итальянской селекции и 2-х местных гибридов 'Nanlin-95' и 'Nanlin-895', выведенных в Нанкинском лесном университете ('I-69' × 'I-45' (*P. × euramaricana* (Dode) Guinier cv. 'I-45/51')). Схема размещения 6×6 м. Опыт заложен в очень благоприятных для тополя условиях местопрорастания – на плодородных почвах низинной

равнины с теплым умеренным климатом (33°08' N, 119°19' E, среднегодовое количество осадков 964 мм, среднегодовая температура 14,3°C). После 24 лет роста сохранность клонов варьировала в очень широких пределах от 0 до 100 %. Сохранность гибридов 'I-69', 'Nanlin-95' и 'Nanlin-895' составила 70,8; 73,3 и 40,0 % соответственно. Средний диаметр клонов варьировал от 28,2 до 53,6 см; диаметры гибридов 'I-69', 'Nanlin-95' и 'Nanlin-895' составили 32,8-44,2 см, 44,1-44,9 см, 45,1-48,1 см соответственно. Средняя высота клонов варьировала от 24,0 до 36,8 м; высоты гибридов 'I-69', 'Nanlin-95' и 'Nanlin-895' составили 25,5-31,0 м, 32,5-34,0 м, 31,0-34,5 м соответственно. Средний объем стволов клонов варьировал от 0,407 до 2,85 м³; объемы стволов гибридов 'I-69', 'Nanlin-95' и 'Nanlin-895' составили 1,325-1,688 м³, 1,76-1,91 м³, 1,85-2,16 м³ соответственно. Сохранность наших гибридов в 21 год варьировала от 45 до 74 % и в среднем составила 60 % (см. табл. 1), что вполне сопоставимо с результатами китайских исследователей. Биометрические данные по нашим гибридам в 21 год (средний диаметр 18,9-37,6 см, в среднем 32,0 см; средняя высота 12,4-18,3 м и в среднем 16,7 м; средний объем ствола 0,151-0,753 м³, в среднем 0,524 м³) существенно ниже соответствующих показателей 24-летних гибридов китайских исследователей, что, скорее всего, связано с менее благоприятными климатическими условиями и большей густотой посадки.

По данным сербских исследователей [21] приживаемость 9-ти клонов тополей после первого года роста в затопляемой пойме с 45-дневным периодом летнего затопления составила от 41,7 до 78,6 %. Приживаемость наших гибридов на КМП в 3-х различных условиях произрастания составила от 76 до 96 % (см. табл. 5).

Коллекция латвийских исследователей [22] создана на заброшенных сельскохозяйственных угодьях (56°41' N, 25°58' E) и включала в себя 34 клон гибридов черных и бальзамических тополей (*P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* и *P. deltoides* × *P. trichocarpa*) различного происхождения (из Швеции, Италии, Германии и Латвии). Размещение 3,5×0,5 м. Приживаемость после 1-го года роста в

среднем составила 82 % с вариацией по гибридам от 42 до 99 %. Средняя высота от 1,09 до 2,35 м.

В Ленинградской области сотрудники СПбГЛТУ и СПбНИИЛХ [23] исследовали 3 испытательных участка гибридных тополей *P. newesis* Bogd. (*P. canadensis* Moench. × *P. balsamifera* L.) и *P. suaveolens* Fisch. На первом участке (размещение 6×2 м) сохранность в возрасте 51 год была 68 %, средний диаметр 40,0 см, средняя высота 34,8, средний запас 474 м³/га. На втором участке (размещение 3×2 м) сохранность в возрасте 31 год была 72 %, средний диаметр 21,6 см, средняя высота 25,8, средний запас 435 м³/га. На третьем участке с очень сильно загущенной посадкой (размещение 2×1 м и 2×0,4 м) сохранность в возрасте 43 года составила только 23,4 %, средний диаметр 16,0 см, средняя высота 16,8, средний запас 332 м³/га.

В целом можно отметить, что организация селекции и проведенные нами работы по получению новых гибридов тополя являются продолжением гибридизационных исследований XX и начала XXI веков.

Однако, несмотря на большое количество гибридизационных работ в нашей стране, только один гибридный сорт тополя ‘Пионер’ А.С. Яблокова получил статус сорта в Государственной сортоиспытательной комиссии [24].

В результате наших полувековых исследований по гибридизации тополей [5, 6] к настоящему времени статус Сорта получили шесть гибридов. Патентами Госсорткомиссии РФ удостоены следующие гибриды: ‘Болид’, ‘Ведуга’, ‘Степная Лада’ (обладатель авторского свидетельства А.П. Царев); ‘Бриз’ и ‘Сюрприз’ (обладатели авторского свидетельства Р.П. Царева, В.А. Царев); ‘Белар’ (обладатели авторского свидетельства А.П. Царев, Р.П. Царева). Проходит процедуру Государственного сортоиспытания гибрид М.М. Вересина ‘Э.с.-38’,

размноженный и испытанный в разных регионах страны А.П. Царевым.

Размножение гибридных и отселектированных лучших интродуцированных гибридов, клонов и сортов осуществлялось в соответствии с многолетними опытами, авторское обобщение которых произведено в недавно изданных “Рекомендациях по выращиванию посадочного материала тополей методами *invivo* и *invitro* с целью закладки долгосрочных сортоиспытательных насаждений” [8].

Как показали представленные результаты исследований, ряд выведенных в Воронежской области гибридов (‘Борей’, ‘Версия’ и ‘Стройн’) могут быть представлены в Госсорткомиссию РФ для регистрации и патентования новых селекционных достижений.

Выводы

1. По результатам гибридизации настоящих тополей (бальзамические×черные и черные×бальзамические) в Центральном Черноземье в 21-летнем возрасте отобраны 4 перспективных гибридных семьи, внутри которых отобрано 16 перспективных межсекционных гибридов.

2. Приживаемость потомств гибридных семей в Семилукской коллекции № 1 составила от 85 до 100 %, а сохранность в 21-летнем возрасте снизилась до 45-74 %.

3. По результатам исследований динамики роста 16-ти новых межсекционных гибридов установлено, что с 6- до 21-летнего возраста средние диаметры стволов увеличились с 8,6 до 24,4 см, средние высоты – с 5,9 до 14,0 м, средние объемы стволов в 21-летнем возрасте варьировали от 0,153 м³ до 0,755 м³.

4. Для представления в Государственную комиссию по сортоиспытанию РФ отобраны три кандидата в сорта: ‘Версия’, ‘Стройн’ и ‘Борей’.

Список литературы

1. Poplars and Willows – Trees for Society and the Environment. Off. J. of FAO on the Forestry and Forest Products Studies. [Ed by J. S. Isebrands and J. Richardson] (Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and CABI). Rome, 2014. 634 p. URL: www.poplar.ca.
2. Poplars And Other Fast-Growing Trees – Renewable Resources for Future Green Economies. Abstr. of Subm. Papers from the International Poplar commission. 25th Session. Berlin, Germany, 13-16 September 2016. Jointly

hosted by FAO and the German Federal Ministry of Ministry of Food and Agriculture. Working Paper IPC/14. Forestry Policy and Resources Division. FAO, Rome, 2016. 222 p. URL: www.fao.org.

3. The role of *Salicaceae* and other fast growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation. Abstr. of Subm. Papers from the International Poplar commission (Rome, Italy 05-08 October 2021). Organized by Council for Agricultural Research and Economics, Italy (CREA), Italian Ministry for Agricultural Food and Forest Policies (MIPAAF), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome (Italy), 2021. 143 p. – URL: <http://www.fao.org/ipc/en/> ; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/>

4. Dickmann D.I., Kuzovkina J. Poplars and Willows of the World, with Emphasis on Silviculturally Important Species. Poplars and Willows – Trees for Society and the Environment [Isebrands J. S., Richardson J. (eds)]. Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and CABI, 2014. pp. 124-199. URL: www.poplar.ca.

5. Царев А.П., Плугатарь Ю.В., Царева Р.П. Селекция и сортоиспытание тополей : монография [под общ. ред. А.П. Царева]. Симферополь: ИТ “АРИАЛ”, 2019. 252 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44730074>

6. Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Евлаков П.М. Гибридизация тополей : монография [под общ. ред. А.П. Царева]. М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО “ВГЛТУ”. Воронеж, 2021. 289 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48706906>

7. Русин Н.С., Благодарова Т.А., Ирошников А.И., Русина Л.М., Свинцова В.С., Машкина О.С., Табацкая Т.М., Кострикин В.А., Горевалова С.Ю., Захарова Л.В. Рекомендации по выращиванию быстрорастущих видов и форм (клонов) тополя и осины для промышленного использования. Воронеж: НИИЛГиС, 2010. 40 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23782660>

8. Царев А.П., Царева Р.П., Царев В.А., Шабанова Е.А. Рекомендации по выращиванию посадочного материала тополей методами *in vivo* и *in vitro* с целью закладки долгосрочных сортоиспытательных насаждений [под ред. д-ра с.-х. наук А.П. Царева]. Воронеж: ФГБОУ ВО “ВГЛТУ”, 2023. 49 с.

9. Carle J. Trends & Perspectives in Poplar & Willow Cultivation: Global Synthesis of National Progress Report. Poplars And Other Fast-Growing Trees – Renewable Resources For Future Green Economies. Abstr. of Subm. Papers from the International Poplar commission. 25th Session. Berlin, Germany, 13-16 September 2016. Jointly hosted by FAO and the German Federal Ministry of Ministry of Food and Agriculture. Working Paper IPC/14. Forestry Policy and Resources Division. FAO, Rome, 2016. p. 1. URL: www.fao.org.

10. Liesebach M. Pappeln und andere schnellwachsende Baumarten in Deutschland [Poplars and other fast-growing tree species in Germany]. Thünen Working Paper 141. Bericht der nationalen Pappelkommission 2016, 2019-2020. 34 p. [http://doi.org.10.3220/WP1585652175000-urn:nbn:de:gbv:253-202003-dn062188-7\(in German\)](http://doi.org.10.3220/WP1585652175000-urn:nbn:de:gbv:253-202003-dn062188-7(in German)).

11. Tsarev A.P., Tsareva R.P. Breeding of frost resistant poplar varieties in Central Chernozem region of Russia // Abstr. of subm. papers and posters from the 26th Session of International Poplar Commission and other fast-growing trees sustaining people and the environment: “The role of *Salicaceae* and other fast growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation” (Rome, Italy 05-08 October 2021). Organized by Council for Agricultural Research and Economics, Italy (CREA), Italian Ministry for Agricultural Food and Forest Policies (MIPAAF), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome (Italy), 2021. P. 7. – URL: <http://www.fao.org/ipc/en/> ; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/>

12. Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A. Poplar testing and breeding in the Central Chernozem region of Russia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 392 (2019). <http://doi.org.10.1088/1755-1315/392/1/0122010>

13. Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Miligula E.N. The new poplar hybrids' growth in the Central Black Earth region of Russia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 392 (2019). <http://doi.org.10.1088/1755-1315/392/1/0122011>

14. Tsarev V.A. Results of the intersectional poplar hybrids' testing in the Central Chernozem region // International Jubilee Scientific and Practical Conference “Innovative directions of development of the forestry

complex” 4-5 October 2018, Voronezh, Russian Federation. FORESTRY 2018. IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 226 (2019). <http://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012006>

15. A. Tsarev, R Tsareva, V. Tsarev, E. Miligula and O. Lenchenkova. Introduced poplar varieties and new hybrids for protective afforestation. IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 595 (2020). International Forestry Forum “Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions”, 23 October 2020. Voronezh, Russian Federation. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012004>

16. Ostry M., Ramstedt M., Newcombe G., Steenackers M. Diseases of Poplars and Willows. Poplars and Willows – Trees for Society and the Environment. Off. J. of FAO on the Forestry and Forest Products Studies [Ed by J.S. Isebrands and J. Richardson] (Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and CABI). Rome, 2014. pp. 443-458. URL: www.poplar.ca.

17. A.P. Tsarev, N.V. Laur and V.A. Tsarev. Phenological forms of aspen in the Central Black Earth region of European Russia. IV Sci.-Techn. Conf. "FORESTS OF RUSSIA: POLICY, INDUSTRY, SCIENCE AND EDUCATION" 22–24 May 2019. St. Petersburg Forest Engineering University, St. Petersburg, Russia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 316 (2019). <http://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012073>

18. Trnka M., Fialová J., Koutecký V., Fajman M., Žalud Z., Hejduk S. Biomass production and survival rates of selected poplar clones grown under a short-rotation on arable land. Plant, Soil and Environment, 2018. v. 54. pp. 78-88. <https://doi.org/10.17221/437-PSE>

19. Ronald S. Zalesny Jr., Craig M. Stange, Bruce A. Birr. Survival, height growth, and phytoextraction potential of hybrid poplar and Russian olive (*Elaeagnus Angustifolia* L.) established on soils varying in salinity in North Dakota, USA. Forests, 2019. v. 10 (672). DOI: <https://doi.org/10.3390/f10080672>.

20. Tian Ye, Liu Ya., Fang S., Yue J., Xu Xi. Genotypic variations in 107 poplar clones grown on a short-term water logging site: Long-term (1992-2015) data on survival rate, growth performance and branching traits. Data in Brief 34 (2021). 106711. 12 p. Published by Elsevier Inc. Journal homepage. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106711/>

21. Нонић М., Максимовић Ф., Деветаковић Ј., Керкез Јанковић И., Шијачић-Николић М. Варијабилност преживљавања и раста садница различитих клонова црне тополе (*Populus nigra* L.) у плавним условима Великог Ратног Острва [Nonić M., Maksimović F., Devetaković J., Kerkez Janković J., Šijačić-Nikolić M. Variability of seedling survival and growth of different black poplar (*Populus nigra* L.) clones in the floodplain conditions of the Great War Island]. Гласник Шумарског факултета. бр. 124, 2021. Београд, Србија: Универзитет у Београду. Шумарски факултет [University of Belgrade, Faculty of Forestry]. С. 59-86. <https://doi.org/10.2298/GSF2124059N> (in Serbian).

22. Šenhofa S., Zeps M., Lazdina D. Winter frost damage and its link to early growth and survival in a poplar clone collection. Forestry and Wood Processing. Research for Rural Development, 2021. v. 36. pp. 70-76. <https://doi.org/10.22616/rrd.27.2021.010>

23. Zhigunov A.V., Danilov D.A., Navalikhin S.V., Janusz S. Yu., Butenko O. Yu. Quality and quantity of poplar plantations on postagrogenic land Northwest region of Russia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 316 (2019). 012084. 6 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012084>

24. Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т.1. “Сорта растений” (официальное издание). М.: ФГБНУ “Росинформагротех”, 2022. 646 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ouigql>.

References

1. Poplars and Willows – Trees for Society and the Environment. Off. J. of FAO on the Forestry and Forest Products Studies.[Ed by J. S. Isebrands and J. Richardson] (Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and CABI). Rome, 2014. 634 p.URL: www.poplar.ca. <https://clck.yandex.ru/redirect/>

2. Poplars And Other Fast-Growing Trees – Renewable Resources For Future Green Economies. Abstr. of Subm. Papers from the International Poplar commission. 25th Session. Berlin, Germany, 13-16 September 2016.Jointly

hosted by FAO and the German Federal Ministry of Ministry of Food and Agriculture. Working Paper IPC/14. Forestry Policy and Resources Division. FAO, Rome, 2016. 222 p. URL: www.fao.org. <https://clck.yandex.ru/redirect/>

3. The role of *Salicaceae* and other fast growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation. Abstr. of Subm. Papers from the International Poplar commission (Rome, Italy 05-08 October 2021). Organized by Council for Agricultural Research and Economics, Italy (CREA), Italian Ministry for Agricultural Food and Forest Policies (MIPAAF), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome (Italy), 2021. 143 p. – URL: <http://www.fao.org/ipc/en/> ; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/>

4. Dickmann D.I., Kuzovkina J. Poplars and Willows of the World, with Emphasis on Silviculturally Important Species. Poplars and Willows – Trees for Society and the Environment [Isebrands J. S., Richardson J. (eds)]. Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and CABI, 2014. pp. 124-199. URL: www.poplar.ca. <https://clck.yandex.ru/redirect/>

5. Tsarev A.P., Plugatar' Ju.V., Tsareva R.P. *Selektsiya i sortoispytanie topolei : monografiya (pod obshch. red. A.P. Tsareva)* [Breeding and variety testing of poplars: monograph (ed. by A.P. Tsarev)]. Simferopol': "ARIAL" Publ., 2019. 252 p. (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=44730074>

6. Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Evlakov P.M. *Gibridizatsiya topolei : monografiya (pod obshch. red. A.P. Tsarev)* [Hybridization of poplars: monograph (ed. by A.P. Tsarev)]. Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya RF, FBGOU VO "VGLTU" Publ. Voronezh, 2021. 289 p. (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=48706906>

7. Rusin N.S., Blagodarova T.A., Iroshnikov A.I., Rusina L.M., Svintsova V.S., Mashkina O.S., Tabatskaya T.M., Kostrikin V.A., Gorevalova S.Ju., Zaharova L.V. *Rekomendatsiyi po vyrashchivaniyu bystrorastushchikh vidov i form (klonov) topolya i osiny dlya promyshlennogo ispol'zovaniya* [Recommendations for the cultivation of fast-growing species and forms (clones) of poplar and aspen for industrial use]. Voronezh: NIILGiS, 2010. 40 p. (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=23782660>

8. Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Shabanova E.A. *Rekomendatsiyi po vyrashchivaniyu posadochnogo materiala topolei metodami in vivo i in vitro s tsel'yu zakladki dolgosrochnykh sortoispytatel'nykh nasazhdenij (pod red. d-ra s.-h. nauk A.P. Tsareva)* [Recommendations for the cultivation of poplar planting material by in vivo and in vitro methods for the purpose of laying long-term variety-testing sites (ed. by Doct. of Agricult. Sci. A.P. Tsarev)]. Voronezh: FGBOU VO "VGLTU", 2023. 49 p. (in Russian).

9. Carle J. Trends & Perspectives in Poplar & Willow Cultivation: Global Synthesis of National Progress Report. Poplars And Other Fast-Growing Trees – Renewable Resources For Future Green Economies. Abstr. of Subm. Papers from the International Poplar commission. 25th Session. Berlin, Germany, 13-16 September 2016. Jointly hosted by FAO and the German Federal Ministry of Ministry of Food and Agriculture. Working Paper IPC/14. Forestry Policy and Resources Division. FAO, Rome, 2016. p. 1. URL: www.fao.org. <https://clck.yandex.ru/redirect/>

10. Liesebach M. Pappeln und andere schnellwachsende Baumarten in Deutschland [Poplars and other fast-growing tree species in Germany]. Thünen Working Paper 141. Bericht der nationalen Pappelkommission 2016, 2019-2020. 34 s. – <http://doi.org.10.3220/WP1585652175000-urn:nbn:de:gbv:253-202003-dn062188-7>(in German).

11. Tsarev A.P., Tsareva R.P. Breeding of frost resistant poplar varieties in Central Chernozem region of Russia // Abstr. of subm. papers and posters from the 26th Session of International Poplar Commission and other fast-growing trees sustaining people and the environment: "The role of *Salicaceae* and other fast growing trees in economic recovery, sustainable wood supply, and climate change mitigation" (Rome, Italy 05-08 October 2021). Organized by Council for Agricultural Research and Economics, Italy (CREA), Italian Ministry for Agricultural Food and Forest Policies (MIPAAF), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome (Italy), 2021. P. 7. – URL: <http://www.fao.org/ipc/en/> ; <http://www.fao.org/ipc/meetings/twenty-sixth-session/en/>

12. Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A. Poplar testing and breeding in the Central Chernozem region of Russia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 392 (2019). – 11 p. – <http://doi.org.10.1088/1755-1315/392/1/0122010>.

13. Tsarev A.P., Tsareva R.P., Tsarev V.A., Miligula E.N. The new poplar hybrids' growth in the Central Black Earth region of Russia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 392 (2019). 13 p. – <http://doi.org.10.1088/1755-1315/392/1/0122011>
14. Tsarev V.A. Results of the intersectional poplar hybrids' testing in the Central Chernozem region // International Jubilee Scientific and Practical Conference “Innovative directions of development of the forestry complex” 4-5 October 2018, Voronezh, Russian Federation. FORESTRY 2018. IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 226 (2019). 12 p. <http://doi.org.10.1088/1755-1315/226/1/012006>
15. A. Tsarev, R Tsareva, V. Tsarev, E. Miligula and O. Lenchenkova. Introduced poplar varieties and new hybrids for protective afforestation. IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci. 595 (2020). International Forestry Forum “Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions”, 23 October 2020. Voronezh, Russian Federation. 14 p. – <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012004>
16. Ostry M., Ramstedt M., Newcombe G., Steenackers M. Diseases of Poplars and Willows. Poplars and Willows – Trees for Society and the Environment. Off. J. of FAO on the Forestry and Forest Products Studies [Ed by J.S. Isebrands and J. Richardson] (Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations and CABI). Rome, 2014. pp. 443-458. URL: www.poplar.ca. <https://clck.yandex.ru/redirect/>
17. A.P. Tsarev, N.V. Laur and V.A. Tsarev. Phenological forms of aspen in the Central Black Earth region of European Russia. IV Sci.-Techn. Conf. "FORESTS OF RUSSIA: POLICY, INDUSTRY, SCIENCE AND EDUCATION" 22–24 May 2019. St. Petersburg Forest Engineering University, St. Petersburg, Russia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 316 (2019). 8 p. – <http://doi.org.10.1088/1755-1315/316/1/012073>
18. Trnka M., Fialová J., Koutecký V., Fajman M., Žalud Z., Hejduk S. Biomass production and survival rates of selected poplar clones grown under a short-rotation on arable land . Plant, Soil and Environment, 2018. v. 54. pp. 78-88. <https://doi.org/10.17221/437-PSE>
19. Ronald S. Zalesny Jr., Craig M. Stange, Bruce A. Birr. Survival, height growth, and phytoextraction potential of hybrid poplar and Russian olive (*Elaeagnus Angustifolia* L.) established on soils varying in salinity in North Dakota, USA. Forests, 2019. v. 10 (672). URL: www.mdpi.com/journal/forests. <https://doi.org/10.3390/f10080672>
20. Tian Ye, Liu Ya., Fang S., Yue J., Xu Xi. Genotypic variations in 107 poplar clones grown on a short-term water logging site: Long-term (1992-2015) data on survival rate, growth performance and branching traits. Data in Brief 34(2021). 106711. 12 p. Published by Elsevier Inc. Journal homepage. URL: www.elsevier.com/locate/dib. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106711>
21. Нонић М., Максимовић Ф., Деветаковић Ј., Керкез Јанковић И., Шијачић-Николић М. Варијабилност преживљавања и раста садница различитих клонова црне тополе (*Populus nigra* L.) у плавним условима Великог Ратног Острва [Nonić M., Maksimović F., Devetaković J., Kerkez Janković J., Šijačić-Nikolić M. Variability of seedling survival and growth of different black poplar (*Populus nigra* L.) clones in the floodplain conditions of the Great War Island]. Гласник Шумарског факултета. бр. 124, 2021. Београд, Србија: Универзитет у Београду. Шумарски факултет [University of Belgrade, Faculty of Forestry]. С. 59-86. <https://doi.org/10.2298/GSF2124059N> (in Serbian).
22. Šenhofa S., Zeps M., Lazdina D. Winter frost damage and its link to early growth and survival in a poplar clone collection. Forestry and Wood Processing. Research for Rural Development, 2021. v. 36. pp. 70-76. <https://doi.org/10.22616/rrd.27.2021.010>
23. Zhigunov A.V., Danilov D.A., Navalikhin S.V., Janusz S. Yu., Butenko O. Yu. Quality and quantity of poplar plantations on postagrogenic land Northwest region of Russia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 316 (2019). 012084. 6 p. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012084>
24. Gosudarstvennyj reestr selektsionnykh dostizhenij, dopushchennykh k ispol'zovaniyu. T.1. ‘Sorta rastenij’ (offitsial'noye izdaniye) [State Register of breeding achievements approved for use. vol. 1. ‘Plant varieties’ (official publication)]. Moscow: FGNBU ‘Rosinformagrotech’ Publ., 2022. 646 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Царев Анатолий Петрович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник отдела биоразнообразия, рационального лесопользования и лесовыращивания ФГБУ “Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии”, ул. Ломоносова, 105, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8019-0016>, e-mail: antsa-55@yandex.ru.

Царева Раиса Петровна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела селекции и семеноводства, ФГБУ “Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии”, ул. Ломоносова, 105, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>, e-mail: tsarais42@mail.ru.

✉ *Царев Вадим Анатольевич* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, старший научный сотрудник отдела селекции и семеноводства, ФГБУ “Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии”, ул. Ломоносова, 105, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; старший научный сотрудник лаборатории ПЦР ФГБОУ ВО “Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова”, ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3921-9339>, e-mail: vad.tsareff@yandex.ru.

Мякотникова Елена Александровна – советник Генерального директора ООО “СИБУР”, ул. Кржижановского, 16/1, г. Москва, Российская Федерация, 117218, e-mail: myakotnikovaea@sibur.ru.

Момот Раиса Владимировна – старший менеджер департамента по устойчивому развитию ООО “СИБУР”, ул. Кржижановского, 16/1, г. Москва, Российская Федерация, 117218, e-mail: momotr@yandex.ru.

Information about the authors

Anatoly P. Tsarev – Dr. Sci. (Agric.), Chief Researcher, Department of Biodiversity, rational forest management and reforestation, All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Lomonosov str., 105, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8019-0016>, e-mail: antsa-55@yandex.ru.

Raisa P. Tsareva – Cand. Sci. (Agric.), Senior Researcher, Leading Researcher, Department of Breeding and Seed Production, All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Lomonosov str., 105, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>, e-mail: tsarais42@mail.ru.

✉ *Vadim A. Tsarev* – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor, Senior Researcher, Department of Breeding and Seed Production, All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, Lomonosova str., 105, Voronezh, Russian Federation, 394087; Senior Researcher, Laboratory of Biotechnologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3921-9339>, e-mail: vad.tsareff@yandex.ru.

Elena A. Myakotnikova – Advisor to the General Director of ‘SIBUR’ LLC, Krzhizhanovsky str., 16/1, Moscow, Russian Federation, 117218, e-mail: myakotnikovaea@sibur.ru.

Raisa V. Momot – Senior Manager of the Department for Sustainable Development of ‘SIBUR’ LLC, Krzhizhanovskogo str., 16/1, Moscow, Russian Federation, 117218, e-mail: momotr@yandex.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author


Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>


УДК 630*232.3





Индекс качества Диксона: связь с технологическим воздействием на лесные семена

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

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

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

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

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

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

Комплексный показатель прогнозирования качества посадочного материала на момент посадки – индекс качества Диксона (DQI) – на данный момент времени достаточно широко представлен в исследованиях роста и развития лесных культур, но не ограничивается ими. На основе систематизации данных на глубину 10 лет, возвращенных поиском по терму «[*Scholar Query* = "*Dickson quality index*"]», динамике индекса качества Диксона в зависимости от критериев технологического воздействия на семена и сеянцы (саженцы) проводили иерархическую классификацию с использованием метода наиболее отдаленных соседей для описания сходства между критериями. Группирование данных выполняли с использованием квадрата Евклидова расстояния. Изменение индекса DQI в большинстве случаев может быть аппроксимировано полиномом второго порядка. Технологическое воздействие на семена перед посевом на основании метода сходства и различия значимо ($p < 0.05$) выделяется в отдельный кластер (квадрат Евклидова расстояния – 4), что предполагает возможный вклад в оценку качества посадочного материала с помощью DQI. В будущих исследованиях планируется получить ответ на вопрос: оказывает ли и какое влияние разделение семян по спектрометрическим свойствам на динамику индекса DQI в процессе онтогенеза? Как влияет размерность отношения высоты растения к диаметру корневой шейки на точность оценки DQI?

Ключевые слова: индекс качества Диксона, лесные семена, подготовка семян, качество сеянца, искусственное лесовосстановление

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


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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Индекс качества Диксона: связь с технологическим воздействием на лесные семена / А. И. Новиков, С. В. Ребко, Т. П. Новикова, Е. П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 23–36. – Библиогр.: с. 29–34 (41 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>.



Поступила 23.02.2023. Пересмотрена 26.03.2023. Принята 27.03.2023. Опубликовано онлайн 15.05.2023.

Dickson Quality Index: relation to technological impact on forest seeds

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

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

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

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

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

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

Abstract

A comprehensive indicator of predicting the quality of planting material at the time of planting – the Dickson quality Index (DQI) – is currently widely represented in studies of the growth and development of forest crops, but is not limited to them. Based on the systematization of data to a depth of 10 years returned by the term [Scholar Query = "Dickson quality index"], on the dynamics of the Dickson quality index depending on the criteria of technological impact on seeds and seedlings (seedlings), a hierarchical classification was carried out using the method of the most distant neighbors to describe the similarity between the criteria. Data grouping was performed using the square of the Euclidean distance. The change in the DQI index in most cases can be approximated by a second-order polynomial. The technological impact on seeds before sowing on the basis of the convergence and difference method is significantly ($p < 0.05$) allocated to a separate cluster (the square of the Euclidean distance is 4), which suggests a possible contribution to the assessment of the quality of planting material using DQI. In future studies, it is planned to get an answer to the question: what effect does the separation of seeds by spectrometric properties have on the dynamics of the DQI index in the process of ontogenesis? How does the dimensionality of the ratio of plant height to the diameter of the root neck affect the accuracy of the DQI estimate?

Keywords: Dickson quality index, DQI, forest seeds, seed spectrometric grading, seed pretreatment, seedling, plant, plant quality, artificial reforestation

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

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

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

For citation: Novikov A. I., Rebko S. V., Novikova T. P., Petrishchev E. P. (2023). Dickson Quality Index: relation to technological impact on forest seeds. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 23-36 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2>.

Received 23.02.2023. **Revised** 26.03.2023. **Accepted** 27.03.2023. **Published online** 15.05.2023.

Введение

Показатели качества [3] сеянцев (саженцев, в том числе *in vitro*) характеризуют как климатическое [2] и орографическое [29] воздействия природно-производственных условий произрастания на онтогенез, так и технологическое воздействие на семена

и сеянцы в процессе получения качественного посадочного материала в лесных питомниках [4; 17; 28], включая автоматизированные. Технологическое воздействие на семена сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в виде разделения по спектрометрическим свойствам не исключает в ряде случаев дифферен-

циации контейнерной всхожести [1] семян и производительности саженцев [26; 27]. Технологическое воздействие на семена сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) в виде протравливания ТМТД (5 г/кг) или фундазолом (4 г/кг) в ряде случаев предопределяет появление тератоморфных¹, как показано у Фрейберга и Стеценко, фенотипов контейнеризированных сеянцев (условно-нормальных и аномальных); пересадка которых на лесокультурную площадь при лесовосстановлении отнюдь не способствует ускоренному росту и развитию (рис. 1).

В качестве показателей качества у семян может использоваться эффективность производства семян (SPE – *Seed production efficiency*) [30]. Для оценки морфофизиологии растения достаточно стабильным показателем качества служит отношение высоты к диаметру корневой шейки (HDR – *Height Diameter Ratio*), или коэффициент выносливости (SSQ – *Seedling Sturdiness Quotient*), или показатель напряженности роста [23] (ПНР), характеризующий уровень восприимчивости сеянца (саженца, в том числе *in vitro*) к стрессорам ветра, засухи и морозов [3]. Достаточно высокие значения HDR, как правило, предполагают этиоляцию саженца [34] в связи со стрессором технологического воздействия при пересадке и обязательную корректировку природно-производственных условий произрастания в питомнике.

Комплексный показатель, включающий HDR, – индекс качества Диксона (DQI – *Dickson Quality Index*), впервые разработанный в 1960 году Александром Диксоном с соавторами² при исследовании саженцев ели белой (*Picea alba* Link.) и сосны белой (*Pinus strobus* L.), для прогнозирования качества посадочного материала на момент посадки, на данный момент времени достаточно широко представлен в исследованиях роста и развития лесных культур, но не ограничивается ими. Первоначально у DQI было семь вариаций, из ко-

торых наиболее достоверные статистически значения для указанных лесных видов были получены у следующего соотношения, используемого в настоящее время:



Рисунок 1. Тератоморфный фенотип сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), созданный пересадкой сеянцев (1+0, containerized, seed spectrometric grading) 24.10.2017 по дну борозды под меч Колесова на постпирогенном экспериментальном участке учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ, демонстрирует явное отличие показателя HDR

Figure 1. Teratomorphic phenotype of Scots pine (*P. sylvestris* L.), created by transplanting a seedling (1+0, containerized, seed spectrometric grading) on 24.10.2017 along the bottom of the furrow at the postpyrogenic experimental site of the VSUFT educational and experimental forestry, demonstrates a clear difference in the HDR indicator

Источник: собственная композиция автора Новиковой Т.П. (28.03.2023)

Source: author's own composition by Novikova T.P. (28.03.2023)

$$DQI = \frac{TDW}{HDR+SRR}, \quad (1)$$

где TDW – сухая масса сеянца, мг; HDR – отношение высоты сеянца к диаметру корневой шейки, см мм⁻¹[41] (или см см⁻¹[19], или мм мм⁻¹[21]); для дерева, находящегося в генеративной стадии онтогенеза, рассчитывается как отношение высоты ствола дерева к диаметру на высоте 1,3 метра (м см⁻¹ [23]);

¹Фрейберг, И.А. Тератогенез сеянцев сосны – биоиндикатор загрязнения почвы лесных питомников пестицидами / И.А. Фрейберг, С.К. Стеценко // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 587. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22567001> (дата обращения: 17.04.2023).

²Dickson, A. Seedling quality – Soil fertility relationships of white spruce, and red and white pine in nurseries / A. Dickson, A.L. Leaf, J.F. Hosner // The Forestry Chronicle. – 1960. – Vol. 36. – № 1. – P. 10. DOI: <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>.

$SRR = SDW / RDW$ – отношение сухой массы надземной, в г (или мг [41]), к подземной, в г (или мг [41]), частям сеянца (стебля с листьями к корням).

Конкретный диапазон значений DQI, характеризующий устойчивость и баланс распределения биомассы сеянцев (саженцев), для каждой категории качества будет варьироваться в зависимости от вида и природно-производственных условий произрастания растения. По утверждению А. Диксона с соавторами, было бы «желательно дальнейшее тестирование всех семи формул при наличии достаточных эмпирических знаний для обеспечения обоснованного взвешивания задействованных факторов²». Минимально допустимое значение DQI составляет 0,2. Наилучшее соотношение SRR рекомендовано 2,0.

Современные исследования предпочитают использование уравнения (1), а также некоторых частных коэффициентов, например, индекса компактности CP (мг см⁻¹) [41]

$$CP = \frac{SDW}{H}, \quad (2)$$

где SDW – сухая масса, в мг, надземной части сеянца; H – высота сеянца, см;

или индекса здоровья сеянца (саженца) SHI (Seedling Health Index), [41]

$$SHI = \left(\frac{D}{H} \times \frac{RDW}{SDW}\right) \times TDW. \quad (3)$$

Индекс качества Диксона используется при оценке качества роста и развития сеянцев (саженцев, в том числе полученных мини-черенками *in vitro* [31]) в природно-производственных условиях в зависимости от технологического воздействия: на семена – скарификации [19] (механически, наждачной бумагой, со сторон эмбриональной оси и противоположной; термически, в воде 2 мин / 80 °C), протравливания [37], сортирования по спектротрическим свойствам [3]; на сеянцы (саженцы, в том числе *in vitro*) – света [12; 25; 34], затенения [7; 34; 36] (например, имитирующего условия подлеска 94 % [7]), температуры [5; 18; 22], полива [13; 16; 25], удобрений [20; 24; 37], субстрата [6; 19; 20], типа контейнера [15; 35; 36] (семенного ложа).

Чтобы проверить гипотезу о том, что технологическое воздействие на семена сеянцы (саженцы, в том числе *in vitro*) дифференцирует DQI, целью данного исследования было оценить степень влияния некоторых технологических факторов

(цвет и происхождение семян, вид предпосевной обработки семян, затенение, субстрат, удобрение, семенное ложе) на динамику DQI для различных видов культур при производстве высококачественного посадочного материала, в том числе и для адаптивного восстановления лесных ландшафтов.

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Объект исследований – набор данных об онтогенезе сеянцев (саженцев, в том числе *in vitro*), оцениваемых индексом качества Диксона.

Предмет исследований – взаимосвязь технологического воздействия на семена, сеянцы (саженцы, в том числе *in vitro*) с индексом качества Диксона.

Сбор данных

Используя комплексную платформу LENS (lens.org), для поиска источников информации формировали запрос по терму [Scholar Query = "Dickson quality index"], возвращающий 415 результатов. Актуализировали результаты фильтрами *published Date.from = 2012-01-01, published Date.to = 2023-12-31, open Access Colour Not*. Распределение 145 источников по видам и дате выхода в свет представлено на рис. 2.



Рисунок 2. Десятилетняя динамика выпуска научных публикаций по видам (N = 145), терм «Dickson quality index»

Figure 2. Ten-year dynamics of the release of scientific publications by type (N = 145), "Dickson quality index" term

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

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

Просмотрели 145 полных текстов, отсортировав их по убыванию даты публикации, особое внимание уделяя разделу «Материалы и методы».

Результаты изучения источников сгруппировали в датасет со столбцами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Критерии отбора результатов систематического поиска по терму «*Dickson quality index*» для оценки технологического воздействия на семена и сеянцы (саженцы)

Table 1

Selecting criteria for the results of a systematic search by the term "*Dickson quality index*" to assess the technological impact on seeds and seedlings (plants)

Вид Species
Forestry (F) / Agriculture (A)
Min DQI
Max DQI
Происхождение семян Seed provenance
Цвет семян Seed colour
Подготовка семян Seed treatment
Свет (затенение) Light (shading)
Температура Temperature
Субстрат Substrate
Удобрение Fertilizer
Семенное ложе Seed bed
Сеянцы / Саженцы (с открытой или закрытой корневой системой) Seedlings / Bare-rooted or containerized plants
Источники References

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Анализ данных

На основе группировки данных о технологическом воздействии на сеянцы (саженцы) по критериям (см. табл. 1) проводили кластерный анализ с использованием метода наиболее отдаленных соседей для описания сходства между обработками [34]. Группирование данных выполняли с использованием квадрата евклидова расстояния. Статистические вычисления вариационных рядов [10] поддерживали программным обеспечением SPSS Statistics, версия 25.

Результаты и обсуждение

Характерные виды взаимосвязи DQI с технологическим воздействием критериев из табл. 1 на семена, сеянцы или саженцы демонстрируют скатерплоты с линиями тренда, аппроксимируемыми

полиномами второго, и реже третьего, порядков (рис. 3).

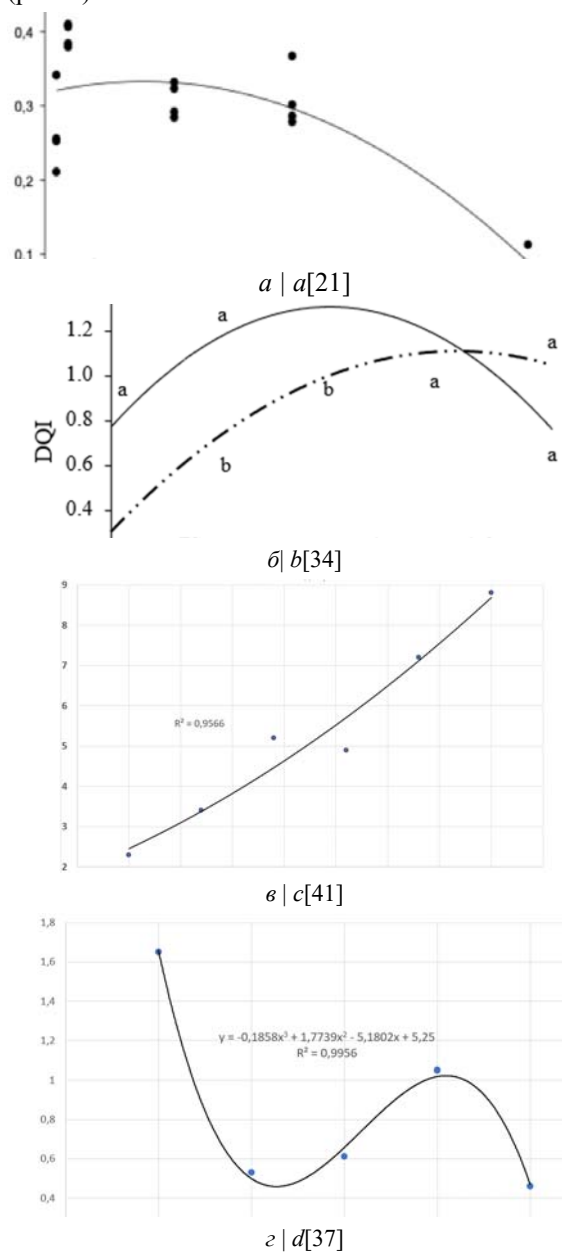


Рисунок 3. Взаимосвязь DQI (по оси ординат) с технологическим воздействием (по оси абсцисс): *a* – элемента (бора) в составе удобрения; *b* – различных доз органического удобрения, в мг, при двух вариантах затенения; *c* – искусственного освещения (плотности фотосинтетического потока фотонов | PPFD, размах 50-400 ммоль м⁻²с⁻¹); *d* – субстрата

Figure 3. Relationship of DQI (on the ordinate axis) with technological impact (on the abscissa axis): *a* – element (boron) in the composition of fertilizer; *b* – different doses of organic fertilizer, in mg, with two shading variations; *c* – artificial lighting (photosynthetic photon flux density | PPFD, span 50-400 mmol m⁻²s⁻¹); *d* – substrate

Источник: статьи, используемые в обзоре (обозначены в квадратных скобках рядом с буквой рисунка)

Source: articles used in the review (indicated in square brackets next to the letter of the figure)

Диаграмма сходства и различия исследований по критериям (табл. 1) представлена на рис. 4.

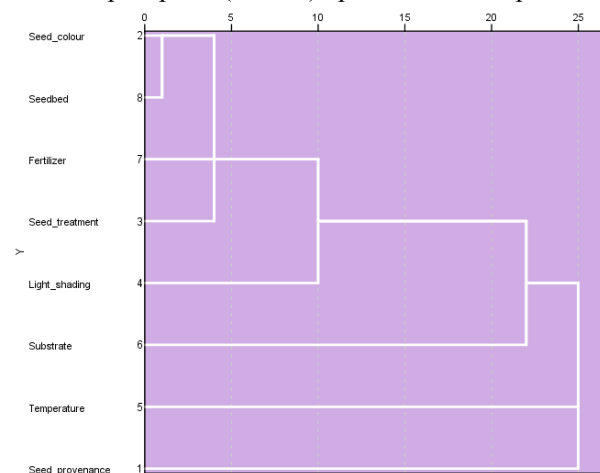


Рисунок 4. Кластеризация критериев технологического воздействия на сеянцы, оцениваемого DQI
Figure 4. Clustering of criteria for technological impact on seedlings assessed by DQI

Источник: собственная композиция авторов
Source: own composition

По степени технологического воздействия исследования условно кластеризуются на четыре группы: 1) технологическое воздействие на семена (квадрат Евклидова расстояния – 4), 2) технологическое воздействие удобрений и света / затенения (10), 3) технологическое воздействие субстрата в сочетании с предпосевной обработкой семян (22), 4) технологическое воздействие температуры (25).

Наряду с представленными взаимодействиями (рис. 2) и характером их изменения (рис. 2) в будущем целесообразно выявить возможность идентификации (например, на основе конволюционной нейросети) по показателю HDR и DQI сеянцев (саженцев), степени их тератоморфности³ (рис. 3) как результата, например, почвенных изме-

³Фрейберг, И.А. Тератогенез сеянцев сосны – биоиндикатор загрязнения почвы лесных питомников пестицидами / И.А. Фрейберг, С.К. Стеценко // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 587. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22567001> (дата обращения: 17.04.2023).

нений в питомнике, разработке эффективной классификации лесопосадочного материала, а также протоколов технологического воздействия на семена и сеянцы в лесном питомнике.

Не менее важно в будущем установить взаимосвязь между длиной, спектрометрическими свойствами, массой хвои и показателями HDR и DQI как базы для определения адаптации. Например, Грязькин и Гаврилова (2022) [14] выявили влияние высоты дерева сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) и, как следствие, освещенности, на морфометрические и массовые показатели хвои.

Для оценки процесса ризогенеза сеянцев (саженцев, в том числе полученных *in vitro*) может быть применен индекс качества корней [33] (RQI – *Root Quality Index*), представляющий собой модифицированную формулу DQI (1):

$$RQI = \frac{TDW}{RSQ + SRR} \quad (4)$$

где RSQ (*root sturdiness quotient*) – коэффициент выносливости корней, определяемый как отношение среднего диаметра корней к общей длине корневой системы, мм.

Заключение

Технологическое воздействие на семена перед посевом на основании метода сходства и различия значимо ($p < 0.05$) выделяется в отдельный кластер (квадрат Евклидова расстояния – 4), что предполагает возможный вклад в оценку качества посадочного материала с помощью DQI.

DQI может быть использован как эффективный инструмент оценки качества адаптации [8; 33] местных и инвазивных видоврастительности в природно-производственных условиях произрастания на разных почвах [9] при восстановлении техногенно [40], пирогенно [26] нарушенных ландшафтов. Оценка адаптации культивируемых *in vitro* растений [11] к природно-производственным условиям произрастания с помощью индекса качества Диксона позволит осуществлять выбор эффективной технологии лесовосстановления.

Список литературы

1. Новиков, А.И. Влияние сортирования семян сосны обыкновенной по цвету и размерам на их грунтовую всхожесть в контейнерах / А.И. Новиков // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37. – № 5. – С. 313-319. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42337219>.
2. Новикова, Т.П. Влияние климатического индекса градусо-дней на виталитет 3-летних сеянцев сосны обыкновенной из сортированных по спектрометрическим свойствам семян / Т.П. Новикова, В.И. Мальшева, Е.П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 1. – С. 110-118. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9>.
3. Петрищев, Е.П. Исследование взаимосвязи биометрических параметров ювенильных сеянцев сосны обыкновенной из кондиционных семян при оценке результатов лесовосстановления / Е.П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 11. – № 4. – С. 161-169. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14>.
4. Andreeva, E. Agrotechnical measures influence to the growth and state of the 1-year-old pine seedlings root system in forest nursery by soil contamination with pesticides / E. Andreeva, S. Stetsenko, G. Terekhov, D. Basistov // Forestry Engineering Journal. – 2022. – Vol. 12. – № 3. – P. 16-25. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/2>.
5. Araújo, E.F. Organic Residues Improve the Quality and Field Initial Growth of Senna multijuga Seedlings / E.F. Araújo, L.B. Sousa, R.S.A. Nóbrega et al. // Journal of Sustainable Forestry. – 2021. – Vol. 40. – № 3. – P. 249-262. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1748060>.
6. Budiadi, B. Seedling Growth and Quality of Avicennia marina (Forssk.) Vierh. under Growth Media Composition and Controlled Salinity in an Ex Situ Nursery / B. Budiadi, W. Widiyatno, H.H. Nurjanto et al. // Forests. – 2022. – Vol. 13. – № 5. – P. 684. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13050684>.
7. Contin, D.R. Effect of different irradiance levels on anatomy and growth of two Malvaceae species during two seasons / D.R. Contin, E. Habermann, V.M. Alves, C.A. Martinez // Revista Brasileira de Botanica. – 2020. – Vol. 43. – № 2. – P. 257-269. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00609-4>.
8. Cuzzuol, G.R.F. Relationship between N, P, and K and the quality and stem structural characteristics of Caesalpinia echinata Lam. plants / G.R.F. Cuzzuol, C.R.D. Milanez, J.M.L. Gomes et al. // Trees. – 2013. – Vol. 27. – № 5. – P. 1477-1484. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0894-9>.
9. Devyatova, T. soil cover and soil properties of small catchments of the Pridonsky cretaceous forest-steppe region of the central Russian upland / T. Devyatova, S. Bozhko, Y. Gorbunova, L. Yablonskih // Forestry Engineering Journal. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 153-168. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/11>.
10. Drapalyuk, M. 140th anniversary of the birthday of Alexander Vladimirovich Tyurin / M. Drapalyuk, A. Sivolapov, V. Bugakov, M. Razinkov // Forestry Engineering Journal. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 5-13. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/1>.
11. Dushimimana, C. Variation of Morphological Traits and Quality Indices of Micropropagated Melia volkensii Gürke Clones before Field Planting / C. Dushimimana, T. Magomere, J. Mulatya et al. // Forests. – 2022. – Vol. 13. – № 2. – P. 337. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020337>.
12. Evlakov, P. Effect of different led spectrum regimens on growth and development of Betula pubescens Ehrh. and Rubus idaeus L. in culture in vitro / P. Evlakov, T. Grodeckaya, O. Fedorova et al. // Forestry Engineering Journal. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 14-30. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/2>.
13. Freitas, V.D.M.B. Influence of exogenous application of abscisic acid in gas exchanges of Hymenaea courbaril L. (Fabaceae) seedlings subjected to water deficit / V.D.M.B. Freitas, S.D.P.Q. Scalon, D.M. Dresch et al. // Floresta. – 2018. – Vol. 48. – № 2. – P. 163. DOI: <https://doi.org/10.5380/rev.v48i2.53076>.
14. Gryaz'kin, A. Biometric characteristics of pine needles growing on burned-out area / A. Gryaz'kin, O. Gavrilova // Forestry Engineering Journal. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 21-31. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/2>.

15. Ivetić, V. Seedling Quality in Serbia – Results from a Three-Year Survey / V. Ivetić, Z. Maksimović, I. Kerkez, J. Devetaković // *Reforesta*. – 2017. – № 4. – P. 27-53. DOI: <https://doi.org/10.21750/REFOR.4.04.43>.
16. Jeromini, T.S. Effects of substrate and water availability on the initial growth of *Alibertia edulis* Rich. / T.S. Jeromini, L.H. de S. Mota, S.D.P.Q. Scalón et al. // *Floresta*. – 2018. – Vol. 49. – № 1. – P. 089. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v49i1.57122>.
17. Kielbasa, P. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration / P. Kielbasa, T. Szulc, M. Szychta et al. // *Croatian journal of forest engineering*. – 2023. – Vol. 44. – № 1. – P. 203-215. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2023.1722>.
18. Köster, E. Effect of biochar amendment on the properties of growing media and growth of containerized norway spruce, scots pine, and silver birch seedlings / E. Köster, J. Pumpanen, M. Palviainen et al. // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2021. – Vol. 51. – № 1. – P. 31-40. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0399>.
19. Lemes, R. de Q. Superação de Dormência e Produção de Mudas de Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) em Diferentes Substratos / R. de Q. Lemes, P.C. da Silva Filho, P.R.L. Souza, L.W. dos Santos // *Uniciências*. – 2023. – Vol. 26. – № 2. – P. 120-123. DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2022v26n2p120-123>.
20. Madrid-Aispuro, R.E. Alternative substrates and fertilization doses in the production of *Pinus cembroides* Zucc. in nursery / R.E. Madrid-Aispuro, J.A. Prieto-Ruíz, A. Aldrete et al. // *Forests*. – 2020. – Vol. 11. – № 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11010071>.
21. Maria, L. de S. Fertilization via soil with boric acid in *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. seedlings / L. de S. Maria, G. Caione, R. de M. Prado // *Research Square*. – 2022. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1995237/v1>.
22. Medeiros Simões, I. Heat Stress Affects the Physiological and Biochemical Quality of *Dalbergia nigra* Seeds in vitro / I. Medeiros Simões, J. Oliveira Baptista, T. Lins Monteiro Rosa et al. // *Forest Science*. – 2021. – Vol. 67. – № 6. – P. 731-739. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/xfab036>.
23. Mihaylova, M. Current preservation, growth intensity and sanitary the condition of the trees of the common pine in need geographical forest cultures of the Voronezh region / M. Mihaylova, M. Chernyshov // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 56-67. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/5>.
24. Morais, T.C.B. de. Efficiency of the CL, DRIS and CND methods in assessing the nutritional status of *Eucalyptus* spp. rooted cuttings / T.C.B. de Morais, R.M. Prado, E.I.F. Traspadini et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10090786>.
25. Mota, C.S. Use of physiological parameters to assess seedlings quality of *Eugenia dysenterica* DC. grown in different substrates / C.S. Mota, F.G. Silva, P. Dornelles et al. // *Australian Journal of Crop Science*. – 2016. – Vol. 10. – № 6. – P. 842-851. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.06.p7501>.
26. Novikov, A.I. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / A.I. Novikov, V. Ivetić // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – P. 012043. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012043>.
27. Novikov, A.I. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / A.I. Novikov, S.V. Sokolov, M.V. Drapalyuk et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 12. – P. 1064. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121064>.
28. Nyoka, B.I. Quality of tree seedlings produced in nurseries in Malawi: an assessment of morphological attributes / B.I. Nyoka, R. Kamanga, J. Njoloma et al. // *Forests Trees and Livelihoods*. – 2018. – Vol. 27. – № 2. – P. 103-117. DOI: <https://doi.org/10.1080/14728028.2018.1443027>.
29. Ozbey, A. Block effect on genetic parameters in a 23-year-old progeny trial of *Pinus brutia* / A. Ozbey, N. Bilir // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 5-13. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/1>.
30. Pérez-Flores, J. Fruit characterization and plant quality of Spanish cedar (*Cedrela odorata* L.) during the early nursery stage / J. Pérez-Flores, N.Y. Hernández-Méndez, F. Sánchez-Gutiérrez et al. // *Agro Productividad*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i1.2325>.

31. Pimentel, N. Effect of mini-cutting size on adventitious rooting and morphophysiological quality of *Ilex paraguariensis* plantlets / N. Pimentel, D. Gazzana, J. de F. Spanevello et al. // *Journal of Forestry Research*. – 2021. – Vol. 32. – № 2. – P. 815-822. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01126-6>.
32. Rocha, J.S. Nitrogen supplementation improves the high-light acclimation of *Guazuma ulmifolia* Lam. seedlings / J.S. Rocha, A.K. Calzavara, E. Bianchini et al. // *Trees*. – 2019. – Vol. 33. – № 2. – P. 421-431. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1788-7>.
33. Saha, R. Integrated assessment of adventitious rhizogenesis in *Eucalyptus*: root quality index and rooting dynamics / R. Saha, H.S. Ginwal, G. Chandra, S. Barthwal // *Journal of Forestry Research*. – 2020. – Vol. 31. – № 6. – P. 2145-2161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01040-6>.
34. Santos, C.C. Morphophysiology and quality of *Alibertia edulis* seedlings grown under light contrast and organic residue / C.C. Santos, A. Goelzer, O.B. da Silva et al. // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. – 2023. – Vol. 27. – № 5. – P. 375-382. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n5p375-382>.
35. Shalizi, M.N. Effects of five growing media and two fertilizer levels on polybag-Raised camden whitegum (*Eucalyptus benthamii* maiden & cambage) seedling morphology and drought hardiness / M.N. Shalizi, B. Goldfarb, O.T. Burney, T.H. Shear // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10070543>.
36. Siqueira Walter, L. How Shading and Container Type Influence *Ilex paraguariensis* A.St.-Hil. Seedling Production / L. Siqueira Walter, M. Melo Moura, M. Moreno Gabira et al. // *Forest Science*. – 2022. – Vol. 68. – № 5-6. – P. 533-539. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxac036>.
37. Souza, A. das G. Controlled-Release Fertiliser and Substrates on Seedling Growth and Quality in *Agonandra brasiliensis* in Roraima / A. das G. Souza, O.J. Smiderle, R.A. Montenegro et al. // *Journal of Agricultural Studies*. – 2020. – Vol. 8. – № 3. – P. 70. DOI: <https://doi.org/10.5296/jas.v8i3.16363>.
38. Souza, A.G. Nutrition and accumulation of nutrients in *Pochota fendleri* seedlings / A.G. Souza, O.J. Smiderle, E.A. Chagas // *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*. – 2018. – Vol. 13. – № 3. – P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i3a5559>.
39. Souza, A.G. Nutrition and accumulation of nutrients in *Pochota fendleri* seedlings / A.G. Souza, O.J. Smiderle, E.A. Chagas // *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*. – 2018. – Vol. 13. – № 3. – P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i3a5559>.
40. Treschevskaya, E. Growth, state and productivity of perennial shrubs on dumps of iron-ore mine / E. Treschevskaya, E. Tikhonova, I. Golyadkina et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 60-76. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/5>.
41. Yang, H.-C. Identification of Appropriate Light Intensity and Daytime Temperature for Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Seedlings in a Plant Factory with Artificial Lighting for Use as Grafting Material / H.-C. Yang, Y.-H. Kim, H.-J. Byun et al. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – № 5. – P. 4481. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15054481>.

References

1. Novikov, A.I. Vliyanie sortirovaniya semyan sosny obyknovnoy po cvetu i razmeram na ih gruntovuyu vskhozhest' v kontejnerah // *Hvojnye boreal'noj zony*. – 2019. – T. 37. – № 5. – С. 313-319. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42337219>.
2. Novikova, T.P. Vliyanie klimaticheskogo indeksa graduso-dnej na vitalitet 3-letnih seyancev sosny obyknovnoy iz sortirovannyh po spektrometricheskim svoystvam semyan / T.P. Novikova, V.I. Malysheva, E.P. Petrishchev // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. – 2022. – T. 12. – № 1. – С. 110-118. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9>.
3. Petrishchev, E.P. Issledovanie vzaimosvyazi biometricheskikh parametrov yuvenil'nyh seyancev sosny obyknovnoy iz kondicionnyh semyan pri ocenke rezul'tatov lesovosstanovleniya / E.P. Petrishchev // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. – 2022. – T. 11. – № 4. – С. 161-169. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/14>.

4. Andreeva, E. Agrotechnical measures influence to the growth and state of the 1-year-old pine seedlings root system in forest nursery by soil contamination with pesticides / E. Andreeva, S. Stetsenko, G. Terekhov, D. Basistov // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 3. – P. 16-25. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/2>.
5. Araújo, E.F. Organic Residues Improve the Quality and Field Initial Growth of Senna multijuga Seedlings / E.F. Araújo, L.B. Sousa, R.S.A. Nóbrega et al. // *Journal of Sustainable Forestry*. – 2021. – Vol. 40. – № 3. – P. 249-262. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1748060>.
6. Budiadi, B. Seedling Growth and Quality of *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. under Growth Media Composition and Controlled Salinity in an Ex Situ Nursery / B. Budiadi, W. Widiyatno, H.H. Nurjanto et al. // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – № 5. – P. 684. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13050684>.
7. Contin, D.R. Effect of different irradiance levels on anatomy and growth of two Malvaceae species during two seasons / D.R. Contin, E. Habermann, V.M. Alves, C.A. Martinez // *Revista Brasileira de Botanica*. – 2020. – Vol. 43. – № 2. – P. 257-269. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00609-4>.
8. Cuzzuol, G.R.F. Relationship between N, P, and K and the quality and stem structural characteristics of *Caesalpinia echinata* Lam. plants / G.R.F. Cuzzuol, C.R.D. Milanez, J.M.L. Gomes et al. // *Trees*. – 2013. – Vol. 27. – № 5. – P. 1477-1484. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0894-9>.
9. Devyatova, T. soil cover and soil properties of small catchments of the Pridonsky cretaceous forest-steppe region of the central Russian upland / T. Devyatova, S. Bozhko, Y. Gorbunova, L. Yablonskih // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 153-168. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/11>.
10. Drapalyuk, M. 140th anniversary of the birthday of Alexander Vladimirovich Tyurin / M. Drapalyuk, A. Sivolapov, V. Bugakov, M. Razinkov // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 5-13. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/1>.
11. Dushimimana, C. Variation of Morphological Traits and Quality Indices of Micropropagated *Melia volkensii* Gürke Clones before Field Planting / C. Dushimimana, T. Magomere, J. Mulatya et al. // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – № 2. – P. 337. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020337>.
12. Evlakov, P. Effect of different led spectrum regimens on growth and development of *Betula pubescens* Ehrh. and *Rubus idaeus* L. in culture in vitro / P. Evlakov, T. Grodeckaya, O. Fedorova et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 14-30. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/2>.
13. Freitas, V.D.M.B. Influence of exogenous application of abscisic acid in gas exchanges of *Hymenaea courbaril* L. (Fabaceae) seedlings subjected to water deficit / V.D.M.B. Freitas, S.D.P.Q. Scalón, D.M. Dresch et al. // *Floresta*. – 2018. – Vol. 48. – № 2. – P. 163. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v48i2.53076>.
14. Gryaz'kin, A. Biometric characteristics of pine needles growing on burned-out area / A. Gryaz'kin, O. Gavrilova // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 21-31. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/2>.
15. Ivetić, V. Seedling Quality in Serbia – Results from a Three-Year Survey / V. Ivetić, Z. Maksimović, I. Kerkez, J. Devetaković // *Reforest*. – 2017. – № 4. – P. 27-53. DOI: <https://doi.org/10.21750/REFOR.4.04.43>.
16. Jeromini, T.S. Effects of substrate and water availability on the initial growth of *Alibertia edulis* Rich. / T.S. Jeromini, L.H. de S. Mota, S.D.P.Q. Scalón et al. // *Floresta*. – 2018. – Vol. 49. – № 1. – P. 089. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v49i1.57122>.
17. Kielbasa, P. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration / P. Kielbasa, T. Szulc, M. Szycha et al. // *Croatian journal of forest engineering*. – 2023. – Vol. 44. – № 1. – P. 203-215. DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2023.1722>.
18. Köster, E. Effect of biochar amendment on the properties of growing media and growth of containerized norway spruce, scots pine, and silver birch seedlings / E. Köster, J. Pumpanen, M. Palviainen et al. // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2021. – Vol. 51. – № 1. – P. 31-40. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0399>.

19. Lemes, R. de Q. Superação de Dormência e Produção de Mudanças de Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.) em Diferentes Substratos / R. de Q. Lemes, P.C. da Silva Filho, P.R.L. Souza, L.W. dos Santos // *Uniciências*. – 2023. – Vol. 26. – № 2. – P. 120-123. DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2022v26n2p120-123>.
20. Madrid-Aispuro, R.E. Alternative substrates and fertilization doses in the production of *Pinus cembroides* Zucc. in nursery / R.E. Madrid-Aispuro, J.A. Prieto-Ruiz, A. Aldrete et al. // *Forests*. – 2020. – Vol. 11. – № 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11010071>.
21. Maria, L. de S. Fertilization via soil with boric acid in *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. seedlings / L. de S. Maria, G. Caione, R. de M. Prado // *Research Square*. – 2022. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1995237/v1>.
22. Medeiros Simões, I. Heat Stress Affects the Physiological and Biochemical Quality of *Dalbergia nigra* Seeds in vitro / I. Medeiros Simões, J. Oliveira Baptista, T. Lins Monteiro Rosa et al. // *Forest Science*. – 2021. – Vol. 67. – № 6. – P. 731-739. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/xfab036>.
23. Mihaylova, M. Current preservation, growth intensity and sanitary the condition of the trees of the common pine in need geographical forest cultures of the Voronezh region / M. Mihaylova, M. Chernyshov // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 56-67. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/5>.
24. Morais, T.C.B. de. Efficiency of the CL, DRIS and CND methods in assessing the nutritional status of *Eucalyptus* spp. rooted cuttings / T.C.B. de Morais, R.M. Prado, E.I.F. Traspadini et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10090786>.
25. Mota, C.S. Use of physiological parameters to assess seedlings quality of *Eugenia dysenterica* DC. grown in different substrates / C.S. Mota, F.G. Silva, P. Dornelles et al. // *Australian Journal of Crop Science*. – 2016. – Vol. 10. – № 6. – P. 842-851. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.06.p7501>.
26. Novikov, A.I. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / A.I. Novikov, V. Ivetić // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – Vol. 226. – P. 012043. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012043>.
27. Novikov, A.I. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / A.I. Novikov, S.V. Sokolov, M.V. Drapalyuk et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 12. – P. 1064. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121064>.
28. Nyoka, B.I. Quality of tree seedlings produced in nurseries in Malawi: an assessment of morphological attributes / B.I. Nyoka, R. Kamanga, J. Njoloma et al. // *Forests Trees and Livelihoods*. – 2018. – Vol. 27. – № 2. – P. 103-117. DOI: <https://doi.org/10.1080/14728028.2018.1443027>.
29. Ozbey, A. Block effect on genetic parameters in a 23-year-old progeny trial of *Pinus brutia* / A. Ozbey, N. Bilir // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 5-13. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/1>.
30. Pérez-Flores, J. Fruit characterization and plant quality of Spanish cedar (*Cedrela odorata* L.) during the early nursery stage / J. Pérez-Flores, N.Y. Hernández-Méndez, F. Sánchez-Gutiérrez et al. // *Agro Productividad*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i1.2325>.
31. Pimentel, N. Effect of mini-cutting size on adventitious rooting and morphophysiological quality of *Ilex paraguariensis* plantlets / N. Pimentel, D. Gazzana, J. de F. Spanevello et al. // *Journal of Forestry Research*. – 2021. – Vol. 32. – № 2. – P. 815-822. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01126-6>.
32. Rocha, J.S. Nitrogen supplementation improves the high-light acclimation of *Guazuma ulmifolia* Lam. seedlings / J.S. Rocha, A.K. Calzavara, E. Bianchini et al. // *Trees*. – 2019. – Vol. 33. – № 2. – P. 421-431. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1788-7>.
33. Saha, R. Integrated assessment of adventitious rhizogenesis in *Eucalyptus*: root quality index and rooting dynamics / R. Saha, H.S. Ginwal, G. Chandra, S. Barthwal // *Journal of Forestry Research*. – 2020. – Vol. 31. – № 6. – P. 2145-2161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01040-6>.

34. Santos, C.C. Morphophysiology and quality of *Alibertia edulis* seedlings grown under light contrast and organic residue / C.C. Santos, A. Goelzer, O.B. da Silva et al. // *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. – 2023. – Vol. 27. – № 5. – P. 375-382. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n5p375-382>.
35. Shalizi, M.N. Effects of five growing media and two fertilizer levels on polybag-Raised camden whitegum (*Eucalyptus benthamii* maiden & cambage) seedling morphology and drought hardiness / M.N. Shalizi, B. Goldfarb, O.T. Burney, T.H. Shear // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10070543>.
36. Siqueira Walter, L. How Shading and Container Type Influence *Ilex paraguariensis* A.St.-Hil. Seedling Production / L. Siqueira Walter, M. Melo Moura, M. Moreno Gabira et al. // *Forest Science*. – 2022. – Vol. 68. – № 5-6. – P. 533-539. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/foxac036>.
37. Souza, A. das G. Controlled-Release Fertiliser and Substrates on Seedling Growth and Quality in *Agonandra brasiliensis* in Roraima / A. das G. Souza, O.J. Smiderle, R.A. Montenegro et al. // *Journal of Agricultural Studies*. – 2020. – Vol. 8. – № 3. – P. 70. DOI: <https://doi.org/10.5296/jas.v8i3.16363>.
38. Souza, A.G. Nutrition and accumulation of nutrients in *Pochota fendleri* seedlings / A.G. Souza, O.J. Smiderle, E.A. Chagas // *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*. – 2018. – Vol. 13. – № 3. – P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i3a5559>.
39. Souza, A.G. Nutrition and accumulation of nutrients in *Pochota fendleri* seedlings / A.G. Souza, O.J. Smiderle, E.A. Chagas // *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*. – 2018. – Vol. 13. – № 3. – P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i3a5559>.
40. Treschevskaya, E. Growth, state and productivity of perennial shrubs on dumps of iron-ore mine / E. Treschevskaya, E. Tikhonova, I. Golyadkina et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 60-76. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/5>.
41. Yang, H.-C. Identification of Appropriate Light Intensity and Daytime Temperature for Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Seedlings in a Plant Factory with Artificial Lighting for Use as Grafting Material / H.-C. Yang, Y.-H. Kim, H.-J. Byun et al. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – № 5. – P. 4481. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15054481>.

Сведения об авторах

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

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

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

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

Information about the authors

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

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

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

✉ *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

Приложение А. Фрагмент исходных данных для построения диаграммы сходства и различия

Таблица А1

Степень влияния на DQI семян или саженцев технологического воздействия на семена

Table A1

The degree of influence on the DQI of seedlings and bare-rooted or containerized plants of technological impact on seeds

Вид Species	Forestry (F) / Agriculture (A)	Min DQI	Max DQI	Размерность HDR HDR dimension	Происхождение семян Seed provenance	Цвет семян Seed colour	Подготовка семян Seed treatment	Свет (затенение) Light (shading)	Температура Temperature	Субстрат Substrate	Удобрение Fertilizer	Семенное ложе Seed bed	Сеянцы / Саженцы (с открытой или закрытой корневой системой) Seedlings / Bare-rooted or containerized plants	Источники References
Цедрела душистая Spanish cedar (<i>Cedrela odorata</i> L.)	F	nda	nda	nda	0	4	4	4	4	3	3	4	S	[30]
Сладкий кедр Sweet cedar (<i>Pachota fendleri</i> (Seem.))	F	nda	nda	nda	4	4	4	4	4	0	3	4	CP	[38; 39]
Соснаобыкновенная Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	F	nda	nda	cm mm ⁻¹	2	3	3	4	4	4	4	4	CP	[3]
Marmelo-do-cerrado (<i>Alibertia edulis</i> (Rich.) A. Rich)	F	0,35	1,3	mm mm ⁻¹	4	4	1	3	4	1	3	4	CP	[34]
Огурец посевной Cucumber (<i>Cucumis sativus</i> L.)	A	2,3	8,8	cm mm ⁻¹	4	4	4	3	2	4	4	4	S	[41]
Ятоба Jatoba (<i>Hymenaea courbaril</i> L.)	F	0,5	1,7	cm cm ⁻¹	4	4	3	4	4	4	3	4	CP	[19]
Падуб парагвайский Yerba mate (<i>Ilex paraguariensis</i> A.ST.-HIL)	F	nda	nda	nda	4	4	4	2	4	4	4	2	S	[36]
Диптерикс душистый Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i> (AUBL.) WILLD.)	F	0,08	0,32	mm mm ⁻¹	4	4	4	4	4	4	3	4	S	[21]

Вид Species	Forestry (F) / Agriculture (A)	Min DQI	Max DQI	Размерность HDR HDR dimension	Происхождение семян Seed provenance	Цвет семян Seed colour	Подготовка семян Seed treatment	Свет (затенение) Light (shading)	Температура Temperature	Субстрат Substrate	Удобрение Fertilizer	Семенное ложе Seed bed	Сеянцы / Саженцы (с открытой или закрытой корневой системой) Seedlings / Bare-rooted or containerized plants	Источники References
Падуб парагвайский Yerba mate (<i>Ilex paraguariensis</i> A.Ст.-Нил)	F	0,09	0,19	cm mm ⁻¹	0	0	0	2	2	2	2	2	MC	[31]
Вяз западноиндийский West Indian elm (<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.)	F	5	25	nda	4	4	4	3	1	4	4	4	CP	[7; 32]
Агонандра бразильская (<i>Agonandra brasiliensis</i> Miers ex Benth. & Hook.f.)	F	0.3	1.65	cm mm ⁻¹	4	4	4	1	4	3	3	4	CP	[37]
Веерник китайский (<i>Miscanthus sinensis</i> Anderss.)	F	8.35	10.64	cm mm ⁻¹	4	4	4	4	4	3	4	4	BRP	[33]

Примечание: 0 – не влияет; 1 – низкая; 2 – умеренная; 3 – высокая; 4 – степень влияния не установлена (или параметры не изучались); S – сеянцы; BRP – саженцы с открытой корневой системой; CP – саженцы с закрытой корневой системой; MC – мини-черенки, полученные в результате проращивания зиготических эмбрионов *in vitro*[31]; nda – нет доступных данных

Note: 0 – does not affect; 1 – low; 2 – moderate; 3 – high; 4 – the degree of influence has not been established (or the parameters have not been studied); S – seedlings; BRP – bare-rooted plants; CP – containerized plants; MC – mini-cuttings *in vitro*, nda – no data available

Источник: систематический поиск авторов, перевод терминов приводится по: Linnard, W. Russian-English, English-Russian forestry and wood dictionary. CABI Publishing, 1999. 270 p.

Source: systematic search for authors; the translation of terms is given by: Linnard, W. Russian-English, English-Russian forestry and wood dictionary. CABI Publishing, 1999. 270 p.


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/3>


УДК 630 : 581.55



Динамика напочвенного покрова в биотопах сосновых лесов при фрагментации, вызванной пожарами, в условиях лесостепной зоны

Валентина Т. Попова¹✉, bot.fiz-rast@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3765-7164>

Анна А. Попова¹, logachevaaa@rambler.ru  <https://orcid.org/0000-0003-4711-5377>

Анастасия К. Кондратьева¹, nasteckomoe@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-4711-5377>

Алексей Н. Цепляев¹, vsealexey@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1938-5660>

Геннадий Я. Климчик², les@belstu.by  <https://orcid.org/0009-0000-8518-2154>

Олеся Г. Бельчина², belchyna@belstu.by  <https://orcid.org/0009-0000-8502-2812>

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

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

Напочвенный покров в лесном растительном сообществе является наиболее динамичной структурой. Нами проанализирован напочвенный покров в до- и после- пожарный период в лесном сообществе соснового леса естественного происхождения, не поврежденного пожарами, но находящегося на границе гарей. Исследование проводили в биотопах соснового леса (Воронежская область, Учебно-опытный лесхоз Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова) путем описания напочвенного покрова трансект в нескольких типах бора неповрежденных пожаром территорий: сухой бор, сырой бор, суборь. За прошедшее десятилетие общее количество видов напочвенного покрова в сосновом лесу сохраняется (63 вида), меняется их видовой состав. Наибольшее видовое разнообразие характерно для суборей. К 2022 году во флоре появляются степные и луговые растения, в первую очередь, злаки, что свидетельствует о смене экологических условий. Полностью исчезли напочвенные лишайники, а также 19 видов растений-индикаторов, шесть из которых входят в Красную книгу Воронежской области. Произошла смена структуры групп растений. Наряду с видами-индикаторами в группах появляются луговые и степные виды. Общее проективное покрытие напочвенного покрова снизилось с 80 до 68 %, также, как и проективное покрытие толстянковых (с 60 до 50%), мхов (с 80 до 70%), брусники (с 40 до 30%) в группах.

Ключевые слова: *сосновый лес, бор, Pinetum, биотоп, напочвенный покров, растения-индикаторы, лесные пожары, горельник*

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Динамика напочвенного покрова в биотопах сосновых лесов при фрагментации, вызванной пожарами, в условиях лесостепной зоны / В. Т. Попова, А. А. Попова, А. К. Кондратьева, А. Н. Цепляев, Г. Я. Климчик, О. Г. Бельчина // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 37–53. – Библиогр.: с. 49–52 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/3>.


Поступила 01.03.2023. Пересмотрена 12.04.2023. Принята 14.04.2023. Опубликована онлайн 15.05.2023.

Dynamics of the pine forest ground cover in the forest-steppe zone after fires

Valentina T. Popova¹✉, bot.fiz-rast@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3765-7164>

Anna A. Popova¹, logachevaaa@rambler.ru  <https://orcid.org/0000-0003-4711-5377>

Anastasia K. Kondratieva¹, nasteckomoe@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0003-4711-5377>

Alexey N. Tseplyaev¹, vsealexey@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-1938-5660>

Gennadiy Y. Klimchik², les@belstu.by  <https://orcid.org/0009-0000-8518-2154>

Olesya G. Bel'china², belchyna@belstu.by  <https://orcid.org/0009-0000-8502-2812>

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

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

Abstract

The ground cover in the forest plant community is the most dynamic structure. We analyzed the ground cover in the pre- and post-fire period in the forest community of a pine forest of natural origin, not damaged by fires, but located on the border of the harem. The study was carried out in biotopes of pine forest (Voronezh region, Educational and Experimental Forestry Enterprise of Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov) by describing the ground cover of the transect in several types of forest of areas undamaged by fire: dry forest, raw forest, subor. Over the past decade, the total number of ground cover species in the pine forest has been preserved (63 species), their species composition is changing. The greatest species diversity is characteristic of suborea. By 2022, steppe and meadow plants, primarily cereals, will appear in the flora, which indicates a change in environmental conditions. Ground lichens have completely disappeared, as well as 19 species of indicator plants, six of which are included in the Red Book of the Voronezh Region. There was a change in the structure of plant groups. Along with the indicator species, meadow and steppe species appear in the groups. The total projective coverage of the ground cover decreased from 80 to 68 %, as well as the projective coverage of the thicket (from 60 to 50%), mosses (from 80 to 70%), lingonberries (from 40 to 30%) in groups.

Keywords: pine forest, Pinetum, habitat, ground cover, plant indicators, fires, burned areas

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Popova V. T., Popova A. A., Kondratieva A. K., Tseplyaev A. N., Klimchik G. Y., Belchina O. G. (2023). Dynamics of the pine forest ground cover in the forest-steppe zone after fires. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 37-53 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/3>.

Received 01.03.2023. **Revised** 12.04.2023. **Accepted** 14.04.2023. **Published online** 15.05.2023.

Введение

Напочвенный покров [1] в лесном растительном сообществе является наиболее динамичной⁴ структурой и представлен множеством дис-

кретных фитоценологических единиц [2,3], выполняет множество экологических функций [4], в том числе депонирования [5-7]. Разнообразие растительного напочвенного покрова вызвано широким

⁴Функциональные группы видов и микрогруппировки лесного напочвенного покрова для моделирования его динамики /

Л.Г. Ханина [и др.]. Математическая биология и биоинформатика. 2015; 10(1): 15-33. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23875212/>.

спектром условий биотопов. О постоянстве экологических условий биотопов можно говорить в случае обнаружения растений-индикаторов, сохранения их ареала. Изменения приводят к формированию биотопов с новой растительностью и исчезновению характерных видов [8]. Анализ динамики дискретных единиц и степени их неоднородности позволит выявлять и прогнозировать смену напочвенного покрова [9] под воздействием абиотических факторов – тенденции к дефициту осадков, пирогенному обезлесению. Пожары, охватывающие все ярусы фитоценозов, наиболее сильно влияют на лесные сообщества: уничтожается не только растительность, но и банк семян, повреждаются подземные органы (корневища, луковицы и т.п.) необходимые для возобновления древостоя и травяного покрова [10]. Ход сукцессионного процесса⁵, в том числе травяных экосистем⁶, зависит от множества факторов [8, 11, 12].

Целью исследования является анализ напочвенного покрова в до- и послепожарный период в лесном сообществе соснового бора естественного происхождения, не поврежденного пожарами на протяжении более 60 лет, но находящегося на границе гарей. При обследовании лесных территорий, пройденных верховым пожаром, оценивали ход восстановления травянистой растительности на горельниках.

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Исследование проводили на территории учебно-опытного лесхоза Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова (Воронежская область, географические координаты: 51.805176, 39.318610) (рис. 1).

Лесной массив располагается между рекой Воронеж и горельниками, на которых проводится искусственное лесовосстановление методом лесных культур. Основная лесообразующая порода – сосна

обыкновенная (*Pinus silvestris* L.), формирующая сосняки, к которой примыкают сплошные участки из дуба черешчатого (*Quercus robur* L.). Возраст деревьев в основном лесу составляет 70 лет. Сопутствующими древесными видами на опытных территориях, не пройденных верховыми пожарами, являются: береза повислая, клен остролистный, кустарники представлены бересклетом бородавчатым.



Рисунок 1. Места описания травянистого напочвенного покрова в сосновом бору, который окружен территориями, уничтоженными пожарами 2010 года

Figure 1. Places of description of the grassy ground cover in the pine forest, which is surrounded by territories destroyed by fires in 2010.

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Сбор данных

Описание напочвенного покрова проводили по трансекте, закладываемой по диагонали на территориях, неповрежденных пожаром 2010 г, но территориально близких к ним (2-5 км до пожарища), а также на пройденных пожарами территориях, на которых были проведено искусственное лесовосстановление сосной обыкновенной. Были обследованы несколько типов бора на территориях, неповрежденных пожарами: сухой бор, сырой бор, суборь, травяная растительность представлена в основном мхами, злаками и осоками, лишайниками, а также разнотравьем. В изучаемых сообществах для описания напочвенного покрова закладывали по 10 площадок (1x1 м), на которых определяли видовой состав, проективное покрытие (за 100 % брали площадь трансекты) и встречаемость видов растений. Выделение мозаико-циклических единиц проводили при повто-

⁵ Гаврилова О.И., Пак К.А. Естественное восстановление леса после пожаров в республике Карелия. Успехи современного естествознания. 2017;(12):38–44. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32309487>.

⁶Титлянова, А. А. Самбуу А. Д.Сукцессии в травяных экосистемах. Новосибирск : Издательство Сибирского отделения РАН, 2016. 185 с. ISBN 978-5-7692-1479-0. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ygeemu>.

ряемости определенных групп растений на трансектах, в соответствии с уточненными экологическими шкалами [13,14], геоботаническими описаниями В.Э. Смирнова⁷. Виды-индикаторы определяли в соответствии со списком растений-индикаторов лесорастительных условий Д.Н. Цыганова⁸.

Анализ данных

Анализ проводили с использованием статистического пакета программ «Stadia». Для проведения эколого-ценотического анализа напочвенного покрова видам сосудистых растений присваивались эколого-ценотические группы (ЭЦГ) в соответствии с базой данных сосудистых растений с указанием ЭЦГ по В.Э. Смирнову⁷. Для сравнения изменений в обилии проективного покрытия групп по годам использовался Т-критерий Вилкоксона.

Результаты и обсуждение

Анализ напочвенного покрова в нетронутых пожарами биотопах

Флористический список напочвенного покрова, составленный на основе данных 2009 и 2020-2022 годов, включает 87 видов. Средние показатели количества видов в биотопах соснового бора показаны на рисунке 2.

Общее видовое разнообразие соснового бора, составленное на основе всех изучаемых биотопов, остается на одном уровне (2009 г. – 63 вида, 2020 г. – 60 видов, без учета повторяющихся видов в биотопах). Наибольшее видовое разнообразие было представлено в субори (35 видов в 2009, 2020). В сухом бору были выявлены 23 вида – в 2009 г. и 24 – в 2020 г., в сыром бору – 17 в 2009 и 18 в 2020 г.

Таким образом, несмотря на верховые пожары 2010 года, потери значительных участков леса, непосредственно граничащих с опытными территориями, количество видов в биотопах сохраняется, но отличается их видовое разнообразие. Видовой

состав напочвенного покрова, обилие, тип биотопа представлены в табл. 1.

Анализ присутствия растений-индикаторов соснового леса показал, что часть из них постепенно исчезла. В субори в 2020 г. исчезли: душица лекарственная, зимолобка зонтичная, рамишия однобокая, орляк обыкновенный, щитовник мужской, щитовник игольчатый. В сухом бору: кладония альпийская, к. оленья, к. лесная, ковыль перистый, кошачья лапка, полынь равнинная, цетрария исландская, чабрец Палласа. В сыром бору исчезли: грушанка круглолистная, плаун булавовидный, п. сплюснутый, сфагнум. Большинство из исчезнувших растений-индикаторов входят в Красную книгу Воронежской области, это: *Lycopodium clavatum* (плаун булавовидный) L., *Lycopodium complanatum* (плаун сплюснутый) L., *Pyrola rotundifolia* L. (грушанка круглолистная), *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton (зимолобка зонтичная), *Stipa pennata* L. s. l. (ковыль перистый), *Sphagnum* (Сфагнум) [15]. Исчезновение данной группы растений может быть связано с изменением гидрологического и светового режима биотопа, так как данная группа растений, требовательна к влажности почвы.

В 2020 г. в биотопах были зафиксированы изменения напочвенного покрова. Так, в сухом бору появились растения, характерные для субори: *Melica nutans* L. (перловник поникший), *Geranium sanguineum* L. (герань кровяно-красная), земляника лесная (*Fragaria vesca* L.), а также дубравные виды: *Glechoma hederacea* L. (будра плющевидная), *Prunella vulgaris* L. (черноголовка обыкновенная). Встречаются участки с 90 % моховым покрытием из *Dicranum undulatum* (дикранум) и *Pleurozium schreberi* (плевроциум). Исчезли типичные растения сухого бора: лишайники, *Stipa pennata* L. (ковыль перистый), *Artemisia campestris* L. (полынь равнинная), *Antennaria* Gaertn. (кошачья лапка) и *Thymus pallasianus* (чабрец Палласа).

⁷Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Бобровский М.В. Обоснование системы эколого-ценотических групп видов растений лесной зоны Европейской России на основе экологических шкал, геоботанических описаний и статистического анализа. Бюл. МОИП. Отд. биол. 2006;111(2):36–47. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9193085>.

⁸Цыганов, Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука. Москва, 1983. 196 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/zsykvb>.

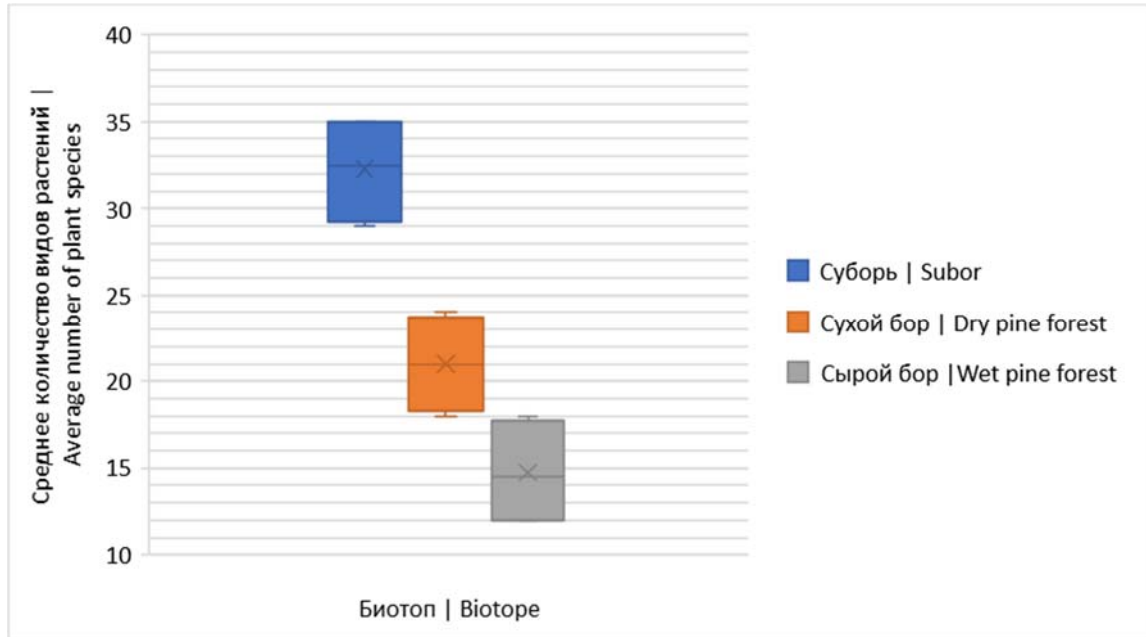


Рисунок 2. Сравнение количества видов в биотопах соснового леса

Figure 2. Comparison of the number of species in pine forest biotopes

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 1

Видовой состав напочвенного покрова в изучаемых типах леса

Table 1

Species composition of the ground cover in the studied forest types

№ п/п	Вид растений Plant species	Об. Ab.	Суборь Subor				Сухой бор Dry pine forest				Сырой бор Wet pine forest							
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
1	Брусника <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.	3-2																
2	Будра плющевидная <i>Glechoma hederacea</i> L.	0-2		+	+	+		+										
3	Букашник горный <i>Jasione montana</i> L.	0-1		+	+	+												
4	Буквица лекарственная <i>Betonica officinalis</i> L.	1-0	+	+														
5	Василек Маршалла <i>Psephellus marschallianus</i> (Spreng.) C. Koch	1-2					+	+	+	+								
6	Вейник наземный <i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth	3-3	+	+	+	+												
7	Вербейник обыкновенный <i>Lysimachia vulgaris</i> L.	2-1											+	+				
8	Вереск обыкновенный <i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hill	2-2											+	+	+	+		
9	Вероника седая <i>Veronica incana</i> L.	2-2		+			+	+	+	+								
10	Гвоздика травянка <i>Dianthus deltoides</i> L.	1-1	+				+	+										
11	Герань кровяно-красная <i>Geranium sanguineum</i> L.	2-1	+	+	+	+												
12	Герань лесная <i>Geranium sylvaticum</i> L.	2-1					+	+	+	+								
13	Горичник горный <i>Peucedanum oreoselinum</i> Moench	2-1		+			+	+	+									
14	Грушанка круглолистная <i>Pyrola rotundifolia</i> L.	1-0											+					
15	Дербенник иволистный <i>Lythrum salicaria</i> L.	1-0											+					
16	Дикранум волнистый <i>Dicranum undulatum</i> Ehrh. ex Web. et Molir	3-3	+	+	+	+		+	+	+			+	+	+			
17	Дрок красильный <i>Genista tinctoria</i> L.	2-2	+	+	+	+		+	+	+								

Естественные науки и лес

№ п/п	Вид растений Plant species	Об. Ab.	Суборь Subor				Сухой бор Dry pine forest				Сырой бор Wet pine forest				
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
18	Душица обыкновенная <i>Origanum vulgare</i> L.	2-2	+		+	+									
19	Живучка женеvская <i>Ajuga genevensis</i> L.	1-1	+												
20	Звездчатка средняя <i>Stellaria media</i> (L.) Vill.	1-2		+	+	+									
21	Зверобой продырявленный <i>Hypericum perforatum</i> L.	2-2	+	+	+	+									
22	Земляника лесная <i>Fragaria vesca</i> L.	3-2	+	+	+	+		+	+	+					
23	Зимолюбка зонтичная <i>Chimaphila umbellata</i> (L.) W.P.C.Barton	1-0	+												
24	Иван-чай узколистный <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	0-2		+	+	+									
25	Камыш лесной <i>Scirpus sylvaticus</i> L.	2-1										+	+		
26	Кладония лесная <i>Cladonia sylvatica</i> (L.) Hoffm.	2-0						+							
27	Кладония оленья <i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Weber ex F.H.Wigg.	2-0						+							
28	Клевер альпийский <i>Trifolium alpestre</i> L.	3-2	+	+	+	+	+	+	+	+					
29	Клевер горный <i>Trifolium montanum</i> L.	3-2	+	+											
30	Ковыль перистый <i>Stipa pennata</i> L.	2-0						+							
31	Колокольчик крапиволистный <i>Campanula trachelium</i> L.	1-0	+												
32	Колокольчик круглолистный <i>Campanula rotundifolia</i> L.	1-0		+					+						
33	Колокольчик персиколистный <i>Campanula persicifolia</i> L.	1-1	+		+	+									
34	Костер безостый <i>Bromus inermis</i> Leyss.	1-2		+	+	+									
35	Костяника <i>Rubus saxatilis</i> L.	2-1										+	+	+	+
36	Кочедыжник женский <i>Athyrium filix-femina</i> (L.) Roth ex Mert.	3-2										+	+	+	+
37	Кошачья лапка <i>Antennaria</i> Gaertn.	3-0						+							
38	Кукушкин лен обыкновенный <i>Polytrichum commune</i> Hedw.	2-1										+	+	+	+
39	Купена лекарственная <i>Polygonatum odoratum</i> (Mill.) Druce	2-2		+	+	+	+	+	+	+	+		+		
40	Ландыш майский <i>Convallaria majalis</i> L.	2-2	+	+	+	+									
41	Лапчатка песчаная <i>Potentilla arenaria</i>	2-0						+							
42	Лапчатка прямая <i>Potentilla recta</i> L.	1-1										+	+	+	+
43	Ластовень лекарственный <i>Vincetoxicum hirsutum</i> Medik.	2-2	+	+	+	+									
44	Лисохвост луговой <i>Alopecurus pratensis</i> L.	0-2							+	+	+				
45	Лютик едкий <i>Ranunculus acris</i> L.	0-1											+	+	+
46	Майник двулистный <i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F.W.Schmidt	2-1											+	+	+
47	Малина обыкновенная <i>Rubus idaeus</i> L.	3-2	+	+	+	+			+	+	+	+			
48	Марьянник луговой <i>Melampyrum pratense</i> L.	2-2		+	+	+			+						
49	Мелкопестичник <i>Erigeron</i> L.	0-2		+	+	+									
50	Молодило побегоносное <i>Sempervivum soboliferum</i> Sims	1-0						+							
51	Мятлик луговой <i>Poa pratensis</i> L.	1-2	+												
52	Овсяница Беккера <i>Festuca beckeri</i> (Hack.) Trautv.	2-2		+				+	+	+	+				
53	Орляк обыкновенный <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn	3-2	+										+	+	+
54	Осока верещатниковая <i>Carex ericetorum</i> Pollich	2-2		+				+	+	+	+				
55	Очиток видный <i>Sedum spectabile</i> Boreau	1-1						+	+	+	+				

№ п/п	Вид растений Plant species	Об. Ab.	Суборь Subor				Сухой бор Dry pine forest				Сырой бор Wet pine forest			
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
56	Очиток едкий <i>Sedum acre</i> L.	2-1					+	+	+	+				
57	Перловник поникший <i>Melica nutans</i> L.	2-2	+					+	+	+				
58	Пижма обыкновенная <i>Tanacetum vulgare</i> L.	1-1	+	+	+	+								
59	Плаун булавовидный <i>Lycopodium clavatum</i> L.	1-0										+		
60	Плаун сплюснутый <i>Lycopodium anceps</i> Wallr.	1-0										+		
61	Плевроциум Шребера <i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.)	3-2	+	+	+	+							+	
62	Повилика европейская <i>Cuscuta europaea</i> L.	0-1		+	+	+								
63	Подмаренник настоящий <i>Galium verum</i> L.	2-1	+		+	+								
64	Подмаренник северный <i>Galium boreale</i> L.	2-0		+										
65	Польнь равнинная <i>Artemisia campestris</i> L.	2-0					+							
66	Прострел раскрытый <i>Pulsatilla patens</i> (L.) Mill.	1-1					+	+	+	+				
67	Пырей ползучий <i>Elytrigia repens</i> (L.) Desv. ex Nevski	1-0	+											
68	Рамишия секунда <i>Orthilia secunda</i> (L.) House	1-0	+											
69	Седмичник европейский <i>Trientalis europaea</i> L.	1-1										+	+	+
70	Смолевка поникшая <i>Silene nutans</i> L.	3-2	+	+	+	+								
71	Смолка обыкновенная <i>Viscaria vulgaris</i> Bernh.	3-2	+	+	+	+								
72	Сфагнум <i>Sphagnum</i> L.	2-0										+		
73	Тростник <i>Phragmites</i> Adans.	2-0										+		
74	Тысячелистник благородный <i>Achillea nobilis</i> L.	1-0	+											
75	Тысячелистник обыкновенный <i>Achillea millefolium</i> L.	2-2	+	+	+	+								
76	Хвощ лесной <i>Equisetum sylvaticum</i> L.	3-2										+	+	+
77	Цетрария исландская <i>Cetraria islandica</i> (L.) Ach.	1-0					+							
78	Цмин песчаный <i>Helichrysum arenarium</i> (L.) Moench	2-2					+	+	+	+				
79	Чабрец Палласа <i>Thymus pallasianus</i> Heinr. Braun	2-0					+							
80	Черноголовка обыкновенная <i>Prunella vulgaris</i> L.	1-0	+					+						
81	Чистотел большой <i>Chelidonium majus</i> L.	0-1		+	+	+								
82	Щавель малый <i>Rumex acetosella</i> L.	2-1	+	+	+	+								
83	Щитовник игольчатый <i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P. Fuchs	1-0	+										+	
84	Щитовник мужской <i>Dryopteris filix-mas</i> (L.) Schott	1-0	+										+	
85	Ясменник красильный <i>Asperula tinctoria</i> L.	1-0	+					+						
86	Ястребинка волосистая <i>Pilosella officinarum</i> F.W. Schultz & Sch. Bip.	2-2		+	+	+	+	+	+	+	+			
87	Ястребинка зонтичная <i>Hieracium umbellatum</i> L.	1-0		+										
Количество видов Number			35	35	29	30	23	24	19	18	17	18	12	12

Примечание: Об. – обилие; «+» - присутствие вида в трансектах, в соответствии с типами соснового бора;

«+» - виды-индикаторы. Обилие – обилие по Браун-Бланке для 2009-2020.

1 – 2009 г., 2 – 2020 г., 3 – 2021 г., 4 – 2022 г.

Note: Ab. – abundance; "+" - the presence of the species in the transects, in accordance with the types of pine forest;

"+" - indicator species. Abundance – abundance according to the Brown-Blanke for 2009-2020

Источник: собственные данные авторов

Source: own data

В субори появились растения сухого бора: *Veronica incana* L. (вероника седая), *Festuca beckeri* (овсяница Беккера), *Carex ericetorum* (осока вер-

шатниковая), *Pilosella officinarum* (ястребинка волосистая), *Peucedanum oreoselinum* (горичник горный) и *Polygonatum odoratum* (купена лекарствен-

ная), а также рудеральные растения – *Cuscuta europaea* L. (повилика), *Erigeron* L. (мелколепестник), *Stellaria media* (L.) (звездчатка средняя). Возникли куртины *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. (иван-чая узколистного). В сыром бору также изменяется видовой состав, в сравнении с 2009 г. Появляются растения сухого бора (*Sedum spectabile* Boreau (очиток видный) и *Helichrysum arenarium* (цмин песчаный)), субори (*Pteridium aquilinum* (орляк обыкновенный), *Dryopteris carthusiana* (щитовник мужской), *Calamagrostis epigejos* (вейник наземный), а также появились луговые злаки (*Poa pratensis* (мятлик луговой), *Elytrigia repens* (пырей ползучий)).

Индикаторы наряду с другими видами формируют напочвенный покров, представляющий собой комбинацию мозаико-структурных единиц, в которых растения связаны друг с другом. На всех опытных участках соснового леса были обнаружены виды растений, растущих вместе и формирую-

щих облик напочвенного покрова. Количество таких групп растений в биотопах сосняка увеличилось. Новые виды степной флоры (*Alopecurus pratensis* (лисохвост луговой), *Poa pratensis* (мятлик луговой), *Erigeron* (мелколепестник), *Ranunculus acris* (лютик едкий)), а также растения-гелиофиты (*Stipa pennata* (ковыль), *Sedum* (очиток), *Chamaenerion angustifolium* (иван-чай узколистный)), встречаются уже не единично, а составляют группы с индикаторами. Таким образом, можно говорить об изменении растительного покрова в ответ на смену экологических условий. Общее проективное покрытие (ОПП) после пожаров в сохранных биотопах снижается и к 2020 г. составляет 68 %. Процент проективного покрытия основных видов напочвенного покрова и их встречаемость на опытных участках, неповрежденных пожарами, в соответствии с типами соснового леса представлены в табл. 2.

Таблица 2

Проективное покрытие и процент встречаемости основных видов напочвенного покрова в зависимости от биотопа
Table 2
The projective coverage and the percentage of occurrence of the main types of ground cover depending on the biotope

Тип сосново-го леса Type of pine forest	Группы видов напочвенного покрова Groups of types of ground cover	Проективное покрытие Projective coverage		Встречаемость видов, % Occurrence of species, %	
		2009	2020	2009	2020
Сухой бор Dry pine forest	Лишайники р. <i>Cladonia</i> , <i>Cetraria</i>	20,3 ± 3,8	-	40	-
	Сем. Толстянковые <i>Crassulaceae</i>	9, 6 ± 6,7	5,7 ± 3,2	60	50
	Сем. <i>Poaceae</i> , <i>Сyperaceae</i>	35, 6 ± 2,4	37, 9 ± 3,3	80	80
	Разнотравье	15,1 ± 2,3	17, 3 ± 1,8	30	30
Суборь Subor	Зеленые мхи – класс <i>Musci</i>	85,3 ± 15,2	86,1 ± 14,8	80	70
	Папоротники <i>Polypodiophyta</i>	25, 7 ± 14,9	23,1 ± 16,1	20	20
	Сем. <i>Poaceae</i>	30, 7 ± 5,2	33, 4 ± 4,3	50	50
	Разнотравье	7, 2 ± 2,6	8, 4 ± 2,2	30	30
Сырой бор Wet pine forest	Белые и зеленые мхи	90, 6 ± 3,3	80, 6 ± 2,8	90	70
	Плауны и папоротники <i>Polypodiophyta</i>	23,2 ± 20,1	-	20	-
	Брусника – <i>Vaccinium myrtillus</i>	22,7 ± 4,7	16,8 ± 4,1	40	30
	Вереск – род <i>Calluna</i>	35,3 ± 5,3	20,4 ± 9,1	30	20
	Сем. <i>Poaceae</i> , <i>Сyperaceae</i>	10,8 ± 6,9	11,3 ± 5,8	30	40

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Группы в биотопах различаются по видовому составу. В 2009 г. можно было выделить следующие группы растений. В субори: *Orthilia secunda*

(рамишия однобокая) – *Chimaphila umbellata* (зимолюбка зонтичная) – *Convallaria majalis* (ландыш майский) – *Dicranum undulatum* (дикранум волни-

стый) – *Pleurozium schreberi* (плевроциум Шребера); *Calamagrostis epigejos* (вейник наземный) – *Viscaria vulgaris* (смолка обыкновенная) – *Silene nutans* (смолевка поникшая) – *Betonica officinalis* (буквица лекарственная) – *Origanum vulgare* (душица обыкновенная); *Melica nutans* (перловник поникший) – *Campanula persicifolia* (колокольчик персиколистный) – *Galium verum* (подмаренник настоящий) – *Asperula tinctoria* (ясменник красильный) – *Geranium sanguineum* (герань кровяно-красная); *Fragaria vesca* (земляника лесная) – *Rubus idaeus* (малина обыкновенная) – *Hypericum perforatum* (зверобой продырявленный) – *Trifolium alpestre* (клевер альпийский) – *Trifolium montanum* (клевер горный); *Pteridium aquilinum* (орляк обыкновенный) – *Dryopteris filix-mas* (щитовник мужской) – *Dryopteris carthusiana* (щитовник игольчатый) – *Achillea millefolium* (тысячелистник обыкновенный) – *Vincetoxicum hirsutaria* (ластовень лекарственный).

В сыром бору: *Trientalis europaea* (седмичник европейский) – *Maianthemum bifolium* (майник двулистный) – *Potentilla recta* (лапчатка прямая) – *Rubus saxatilis* (костяника); *Calluna vulgaris* (вереск обыкновенный) – *Polytrichum commune* (кукушкин лен обыкновенный); *Athyrium filix-femina* (кочедыжник женский) – *Equisetum sylvaticum* (хвощ лесной) – *Pyrola rotundifolia* (грушанка круглолистная); *Sphagnum* (сфагнум) – *Polytrichum commune* (кукушкин лен обыкновенный) – *Lycopodium* (плауны) – *Vaccinium vitis-idaea* (брусника); *Scirpus sylvaticus* (камыш лесной) – *Phragmites* (тростник) – *Lythrum salicaria* (дербенник иволистный) – *Potentilla recta* (лапчатка прямая).

В сухом бору выделялись: *Cladonia* (кладонии) – *Carex ericetorum* (осока верещатниковая) – *Festuca beckeri* (овсяница Беккера) – *Festuca beckeri* (горичник горный); *Stipa pennata* (ковыль перистый) – *Pilosella officinarum* (ястребинка волосистая) – *Thymus pallasianus* (чабрец Палласа) – *Artemisia campestris* (полынь равнинная); *Pulsatilla patens* (прострел раскрытый) – *Antennaria* (кошачья лапка) – *Veronica incana* (вероника седая) – *Polygonatum odoratum* (купена лекарственная); *Sempervivum soboliferum* (молодило побегоносное) – *Sedum spectabile* (очиток видный) – *Sedum acre* (очиток едкий) – *Helichrysum arenarium* (цмин песчаный).

В 2020 году со сменой видового состава и привносом в нее новых видов изменяются группы растений. В сыром бору были выделены: *Dryopteris filix-mas* (щитовник мужской) – *Dryopteris carthusiana* (щитовник игольчатый) – *Pteridium aquilinum* (орляк обыкновенный); *Rubus saxatilis* (костяника) – *Vaccinium vitis-idaea* (брусника) – *Maianthemum bifolium* (майник двулистный) – *Trientalis europaea* (седмичник европейский) – *Potentilla recta* (лапчатка прямая); *Athyrium filix-femina* (кочедыжник женский) – *Equisetum sylvaticum* (хвощ лесной) – *Lythrum salicaria* (дербенник иволистный) – рогоз; *Poa pratensis* (мятлик луговой) – *Elytrigia repens* (пырей ползучий); *Dicranum undulatum* (дикранум волнистый) – *Polytrichum commune* (кукушкин лен обыкновенный) – *Calluna vulgaris* (вереск обыкновенный) – *Veronica incana* (вероника седая) – *Ranunculus acris* (лютик едкий); *Calamagrostis epigejos* (вейник наземный) – *Sedum spectabile* (очиток видный) – *Helichrysum arenarium* (цмин песчаный) – злаки.

В сухом бору: *Festuca beckeri* (овсяница Беккера) – *Peucedanum oreoselinum* (горичник горный) – *Campanula rotundifolia* (колокольчик круглолистный) – *Pulsatilla patens* (прострел раскрытый) – *Alopecurus pratensis* (лисохвост); *Melica nutans* (перловник поникший) – *Helichrysum arenarium* (цмин песчаный) – *Chelidonium majus* (чистотел большой) – *Poa pratensis* (мятлик луговой); *Polygonatum odoratum* (купена лекарственная) – *Psephellus marschallianus* (василек Маршалла) – *Fragaria vesca* (земляника лесная) – *Rubus idaeus* (малина обыкновенная) – *Trifolium alpestre* (клевер альпийский); *Pilosella officinarum* (ястребинка волосистая) – *Geranium sanguineum* (герань кровяно-красная) – *Prunella vulgaris* (черноголовка обыкновенная) – *Melampyrum pratense* (марьянник луговой) – *Asperula tinctoria* (ясменник красильный); *Sedum acre* (очиток едкий) – *Sedum spectabile* (очиток видный) – *Carex ericetorum* (осока верещатниковая) – *Veronica incana* (вероника седая) – *Dicranum undulatum* (дикранум волнистый).

В субори сформировались следующие группы растений: *Calamagrostis epigejos* (вейник наземный) – *Viscaria vulgaris* (смолка обыкновенная) – *Silene nutans* (смолевка поникшая) – *Festuca beckeri* (овсяница Беккера) – *Galium verum* (подмаренник

обыкновенный); *Peucedanum oreoselinum* (горичник горный) – *Pilosella officinarum* (ястребинка волосистая) – *Carex ericetorum* (осока верещатниковая) – *Bromus inermis* (костер безостый) – осоки; *Fragaria vesca* (земляника лесная) – *Achillea millefolium* (тысячелистник обыкновенный) – *Rumex acetosella* (щавель малый) – *Hypericum perforatum* (зверобой продырявленный); *Geranium sanguineum* (герань кроваво-красная) – *Betonica officinalis* (буквица лекарственная) – *Trifolium montanum* (клевер горный) – *Trifolium alpestre* (клевер альпийский) – *Tanacetum vulgare* (пижма обыкновенная) – *Polygonatum odoratum* (купена лекарственная); *Erigeron* (мелколепестник) – *Veronica incana* (вероника седая) – *Melampyrum pratense* (марьянник луговой); *Campanula rotundifolia* (колокольчик круглолистный) – *Rubus idaeus* (малина обыкновенная) – *Stellaria media* (звездчатка средняя) – *Glechoma hederacea* (будра плющевидная); *Vincetoxicum hirundinaria* (ласто-вель лекарственный) – *Hieracium umbellatum* (ястребинка зонтичная) – *Chamaenerion angustifolium* (иван-чай узколистный) – *Jasione Montana* (букашник горный); *Dicranum undulatum* (дикранум волнистый) – *Pleurozium schreberi* (плевроциум Шребера). Т.о., в группах появились луговые и сорно-рудеральные растения.

Анализ эколого-ценотических групп

В ходе исследования было отмечено изменение видового состава напочвенного покрова, что, возможно, связано с изменениями условий среды вследствие влияния близкого расположения горельников: увеличением освещенности и снижением влажности почв. Для того, чтобы проверить, что изменение видового состава является ответом на изменение условий среды (т.е. что изменение видов является качественным), был проведен анализ эколого-ценотических групп. Эколого-ценотические группы объединяют растения, которые сходны по своему отношению к совокупностям экологических факторов, характерных для определенных растительных сообществ. В современной ботанической науке ЭЦГ часто применяются оценки экосистемного и структурного разнообразия растительного покрова и прогнозирования его динамики.

На каждом участке леса: субори, сухом бору и сыром бору для каждого вида сосудистых растений напочвенного покрова присваивалась та или иная ЭЦГ по В.Э. Смирнову. Затем сравнивалось количество видов в группах в 2009 и 2020 году (рис. 3).

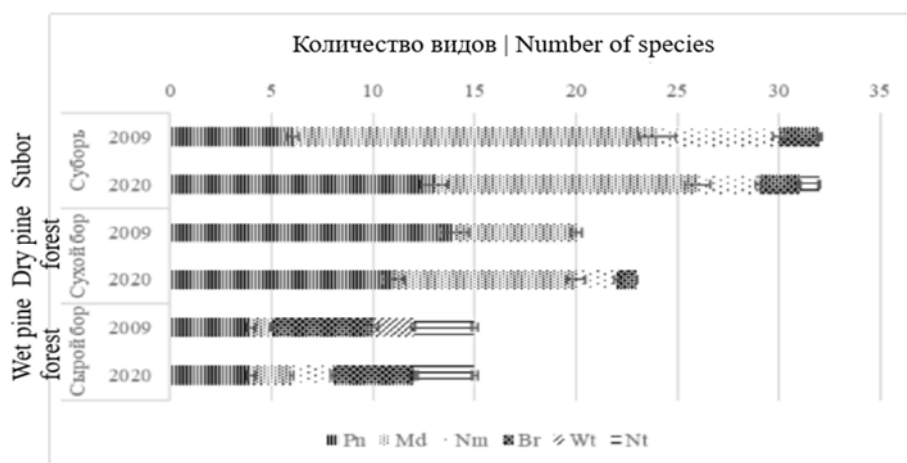


Рисунок 3. Сравнение количества видов в эколого-ценотических группах 2009 и 2020 года: Pn – группа сосновых лесов, Md – лугово-степная, Nm - неморальная, Br - бореальная, Wt – группа водно-болотных угодий, Nt – нитрофильная

Figure 3. Comparison of the number of species in the ecological cenotic groups of 2009 and 2020: Pn is a group of pine forests, Md is meadow-steppe, Nm is non-moral, Br is boreal, Wt is a group of wetlands, Nt is nitrophilic

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Исходя из гистограммы, можно отметить, что основное ядро видов субори и сухого бора составляют виды соснового леса (Pn), в то время как в сыром бору значительную долю имеют растения бореальной (Br), нитрофильной (Nt) и группы водно-болотных угодий (Wt), т.к. именно они наиболее тесно связаны с специфическими экологическими условиями этих сообществ.

Рассматривая изменение количества видов в каждой ЭЦГ по годам, можно наметить некоторые тенденции к трансформации растительного покрова на исследуемых территориях. Так, в суборах снижается количество видов неморальной группы при увеличении доли видов сосновых лесов. Это может свидетельствовать о постепенном переходе субори к состоянию сухого бора. Для того, чтобы определить значительность изменений, было проведено сравнение изменения обилия видов группы Pn по T-критерию Вилкоксона. Значение $T_{эмп} = 12$ (при $T_{кр}(0,05) = 17$) подтверждает статистически достоверное различие обилия – в 2020 году оно значимо больше, чем в 2009. Это дополнительно подтверждает предположение о выраженном сукцессионном процессе трансформации субори в сухой бор при изменении экологических условий в местах, находящихся под влиянием пожара.

В сыром бору также были выявлены серьезные изменения соотношения видов в ЭЦГ по годам. Комплекс видов нитрофильной (Nt), бореальной (Br) группы и группы водно-болотных угодий (Wt) существенно снизил свое видовое присутствие, причем, Wt выпал из состава сообщества полностью. T-критерий Вилкоксона показывает, что и обилие этих видов достоверно снижается ($T_{эмп} = 1$, $T_{кр}(0,05) = 10$). Появление же видов неморальной группы и увеличение доли видов лугово-степной группы обозначают тенденцию к изменению сообщества сырого бора в суборь.

Менее всего меняется сосудистая флора сухого бора. Статистически достоверных различий в обилии ЭЦГ 2009 года и 2020 года не обнаружено. Однако, увеличивается разнообразие этих групп с двух (Pn, Md) до четырех (Pn, Md, Nm, Br). С учетом снижения участия доли лишайников и мхов в создании проективного покрытия такое изменение функционального разнообразия сосудистой флоры

напочвенного покрова представляется интересным для дальнейшего наблюдения.

Анализ напочвенного покрова на горельниках

На сгоревших территориях, до пожара 2010 г, выделялись те же биотопы соснового леса. Искусственное лесовосстановление проводили сотрудники и студенты ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», начиная с 2012 г. Были высажены сеянцы сосны обыкновенной методом лесных культур. В настоящее время в низинах, где ранее в допожарный период располагались биотопы сырого бора, формируются пересыхающие при длительных засухах болота, на возвышенностях – степная растительность с подростом сосны обыкновенной.

В 2020 г. видовое разнообразие напочвенного покрова лесных культур составляет всего 19 видов. некоторые виды являются типичными первопроходцами горельников, это: *Chamaenerion angustifolium* (иван-чай узколистный), виды, обычно приуроченные к сухому бору (*Sedum acre* (очиток едкий), *Potentilla arenaria* (лапчатка песчаная), *Berteroa incana* (икотник серо-зеленый), *Helichrysum arenarium* (цмин песчаный), *Hieracium umbellatum* (ястребинка зонтичная)) и к субори (*Tanacetum vulgare* (пижма обыкновенная), *Rumex acetosella* (щавель малый), *Calamagrostis epigejos* (вейник наземный)), а также: *Erigeron* (мелколепестник), *Solidago virgaurea* (золотарник обыкновенный), *Artemisia vulgaris* (полынь обыкновенная), *Verbascum thapsus* (коровяк медвежье ухо), *Poa pratensis* (мятлик луговой), *Poa stepposa* (мятлик степной), *Festuca gigantea* (овсяница гигантская), *Linaria vulgaris* (льнянка обыкновенная), *Jasione montana* (букашник горный), *Calamagrostis epigejos* (вейник наземный).

Растительность низин горельников составляют: очиток видный, рогоз широколистный, *Lythrum salicaria* (дербенник иволистный), *Scirpus sylvaticus* (камыш лесной), *Phragmites* (тростник южный). Прослеживается связь с растениями сырого бора, находившимися там до пожара 2010 г. При переходе на возвышенности отмечаются вейник наземный, цмин песчаный, лапчатка песчаная.

Видовой состав напочвенного покрова в биотопах соснового леса показывает сохранность общего числа видов, однако группы растений изменяют-

ся. Смена видового состава фитоценозов может быть вызвана изменениями экологических условий биотопа, таких как освещенность, температура, минеральный состав и влажность почвы, ее pH.

Отсутствие на горельниках травянистых растений соснового леса свидетельствует об уничтожении почвенного банка семян. Восстановление растительности происходило в первую очередь за счет появления злаков: *Festuca gigantea* (овсяница гигантская), *Agrostis capillaris* (полевица тонкая),

Calamagrostis epigejos (вейник наземный), и *Chamaenerion angustifolium* (иван-чай узколистый). Появление растений, нетребовательных к увлажнению почв или устойчивых к их недостатку, в субори и сыром бору говорит об изменении экологических условий. Анализ количества осадков в период с 2009 по 2020 г. по месяцам весенне-летнего периода показал варьирование их объема, постепенное снижение к 2020 г. осадков в марте, апреле, июне, августе (рис. 4).

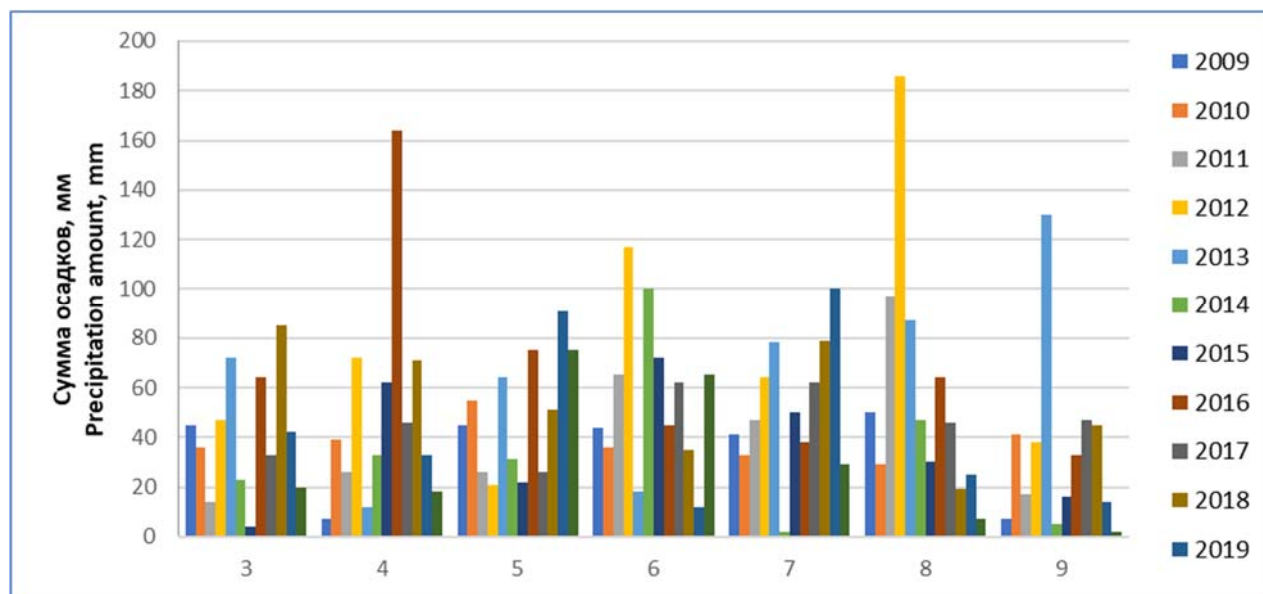


Рисунок 4. Диаграмма суммы осадков по месяцам с 2009 по 2020 г. По оси абсцисс цифры 3-9 обозначают номер месяца, «3» - март и т.д. по порядку

Figure 4. Diagram of precipitation by month from 2009 to 2020. On the abscissa axis, the numbers 3-9 denote the number of the month, "3" - March, etc. in order

Источник данных: диаграмма построена по данным http://www.pogodaiklimat.ru/history/34123_2.htm
 Source: the diagram is based on the data http://www.pogodaiklimat.ru/history/34123_2.htm

Песчаные почвы⁹ сосновых лесов обладают слабой водоудерживающей способностью [16], сильным прогреванием верхних горизонтов [17]. Появление открытых территорий без растений¹⁰ приводит к еще большему прогреву почвы и гибели части растений напочвенного покрова и всходов сосны обыкновенной [3, 8, 18]. Развитие напочвенного покрова на горельниках соответствует начальным этапам пиро-

генной сукцессии. По видовому составу напочвенный покров сосняков лесостепной зоны отличается от таежной и среднетаежной зоны [19, 20] преобладанием злаковых растений, бедным видовым составом мхов и лишайников, папоротников и плаунов, а также индикаторов соснового леса. При кратковременных низовых пожарах и близости грунтовых вод происходит быстрое восстановление растительности сырых боров и суборей [10, 19, 20]. Сукцессии на горельниках таежной и среднетаежной зоны идут схожим образом. При полном уничтожении леса пожаром на горячих не происходит появления типичных растений-первопроходцев, лишайники погибают полностью

⁹ Карпачевский, Л. О. Курс лесного почвоведения / Л. О. Карпачевский, Ю. Н. Ашинов, Л. В. Березин. Майкоп : Аякс, 2009. 348 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/tlv1st>

¹⁰ Рунова Е.М., Савченкова В.А. Особенности естественного возобновления леса на основных типах вырубок Приангарья. Актуальные проблемы лесного комплекса. 2008;21. Режим доступа: <https://elibrary.ru/tyzgzkz>

при пожарах любой интенсивности от теплового воздействия. Повышение температуры, освещенности и снижение влажности в сохранных лесах, граничащих с горящими, приводит к исчезновению напочвенных лишайников [19, 20].

Выводы

Анализ напочвенного покрова в сосновых лесах лесостепной зоны показал, что после пожаров 2010 г.:

1. Видовое богатство сохраняется на уровне 63-65 видов, флористический состав меняется.

2. В субори появились растения сухого бора, а также сорно-рудеральные растения, куртины иван-чая узколистного (*Chamaenerion angustifolium* (L.) SCOP.), исчезли некоторые типичные растения сухого бора. В сыром бору появились растения субори и луговые злаки.

3. Исчезла часть растений-индикаторов, которые входят в Красную книгу Воронежской области (2011): *Lycopodium clavatum* L., *Lycopodium complanatum* L., *Pyrola rotundifolia* L., *Chimaphila umbellata* (L.) W. Barton, *Stipa pennata* L. s. l., *Sphagnum* sp.

4. Изменение состава и соотношения эколого-ценотических групп на исследуемых территориях свидетельствует об изменении как экологических условий, произошедших вследствие пожара (увеличение освещенности, повышение температуры почв и воздуха, изменение влажности почвы и ее pH), так и сопутствующих им трансформациях растительных сообществ.

5. Восстановление напочвенного покрова на горящих после посадки лесных культур сосны обыкновенной в течение первых восьми лет после пожара происходило за счет появления злаков и иван-чая узколистного (*Chamaenerion angustifolium* (L.) SCOP.), которые являются характерными видами для постпирогенных сукцессий, а также некоторыми видами, обычно приуроченными к сухому бору, – икотником серо-зеленым (*Berteroa incana* (L.) DC.), очитком едким (*Sedum acre* L.), лапчаткой песчаной (*Potentilla incana* P.GAERTN., B.MEY. & SCHERB.), цмином песчаным (*Helichrysum arenarium* (L.) MOENCH). Отсутствие травянистых растений свидетельствует об уничтожении почвенного банка семян.

Список литературы

1. Ufimtsev, V.I. Structure of the living ground cover in pine forests on dumps of Kuzbass / V.I. Ufimtsev, T.O. Strelnikova, O.A. Kupriyanov. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2018; 44: 36-58. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/44/3>.
2. Розенберг Г.С. Количественные методы фитоценологии в работах Б. М. Миркина и их современное состояние. Фиторазнообразие Восточной Европы. 2018; 2 (3): 31-54. Режим доступа: <https://elibrary.ru/yovlul>.
3. Chernenkova T., Morozova O., Belyaeva N., Puzachenko M. Actual organization of forest communities with broad-leaved trees in broad-leaved-coniferous zone (with Moscow Region as an example). Rastitel'nost' Rossii. 2018;107-130. DOI: <https://doi.org/10.31111/vegrus/2018.33.107>.
4. Телеснина В.М., Семенов О.В., Богатырёв Л.Г. Свойства лесных подстилок во взаимосвязи с напочвенным покровом в лесных экосистемах Подмосковья (на примере УОПЭЦ «Чашниково»). Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2017; 4. Режим доступа: <https://elibrary.ru/zmirjn>.
5. Forsmark, B. Low and high nitrogen deposition rates in northern coniferous forests have different impacts on aboveground litter production, soil respiration, and soil carbon stocks / B. Forsmark, A. Nordin, N.I. Maaroufi et al. Ecosystems. 2020; 23(7): 1423-1436. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00478-8>.
6. Landuyt, D. The functional role of temperate forest understorey vegetation in a changing world / D. Landuyt, E. De Lombaerde, M.P. Perring et al. GlobalChangeBiology. 2019; 25 (11): 3625–3641. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14756>.
7. Сергеева О.В., Мухортова Л.В., Кривобоков Л.В. Распределение запасов подстилки и биомассы живого напочвенного покрова в северной тайге центральной Эвенкии в зависимости от рельефа. Сибирский лесной журнал. 2020;1:38-46. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42400860>.

8. Gill N., Jarvis D., Rogan J., Kulakowski D. Disturbance history modulates how litter and herbaceous cover influence conifer regeneration after fire. *International Journal of Wildland Fire*. 2020;29. DOI: <https://doi.org/10.31111/10.1071/WF19028>.
9. Kudryavtsev A., Oparin M., Oparina O., Mamaev A., Kovalev, D. State of split birch woods of the southern trans-Urals in the zone of high anthropogenic load on natural ecosystems. *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2021; 427-441. DOI: <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2020-4-427-441>.
10. Splawinski, T. The colonization of young fire-initiated stands by the crustose lichen *Trapeliopsis granulosa* and its potential effect on conifer establishment and stand succession / T. Splawinski, S. Gauthier, N. Fenton et al. *Silva Fennica*. 2018; 52 (1). DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.7791>.
11. Jílková, V. Post-fire forest floor succession in a Central European temperate forest depends on organic matter input from recovering vegetation rather than on pyrogenic carbon input from fire / V. Jílková, M. Adámek, G. Angst et al. *Science of the Total Environment*. 2023; 861: 160659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160659>.
12. Ananyev, V.A. Fire severity controls successional pathways in a fire-affected spruce forest in Eastern Fennoscandia / V.A. Ananyev, V. V. Timofeeva, A.M. Kryshen' et al. *Forests*. 2022; 13 (11):1775. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111775>.
13. Baranovski, B. Comparison of commonly used ecological scales with the Belgard Plant Ecomorph System / B. Baranovski, N. Roschina, L. Karmyzova, I. Ivanko. *BiosystemsDiversity*. 2018; 26 (4): 286-291. DOI: <https://doi.org/10.15421/011843>.
14. Изучение биоразнообразия некоторых лесопарковых фитоценозов Ростовской агломерации / А. А. Наливайченко, П. Н. Скрипников, С. Н. Горбов, А. Ю. Матецкая. *Лесотехнический журнал*. 2022; 12 (4): 169-184. DOI <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/12>.
15. Красная книга Воронежской области: в 2 томах. Том 1. Растения, лишайники, грибы / под общ. науч. ред. В. А. Агафонова – Воронеж: Центр духовного возрождения Черноземного края, 2018. 412 с. ISBN 978-5-91338-165-1. Режимдоступа: <https://elibrary.ru/vzxezq>.
16. Gustafson, E.J. Simulating Growth and Competition on Wet and Waterlogged Soils in a Forest Landscape Model / E.J. Gustafson, B.R. Miranda, A.Z. Shvidenko, B.R. Sturtevant. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2020; 8: 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.598775>.
17. Ribeiro-Kumara, C. How do forest fires affect soil greenhouse gas emissions in upland boreal forests? A review / C. Ribeiro-Kumara, E. Köster, H. Aaltonen, K. Köster. *EnvironmentalResearch*. 2020; 184: 109328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109328>.
18. Приходько, О. Ю. Естественное лесовозобновление после выборочных рубок в лиственных лесах Приморского края / О. Ю. Приходько, О. Р. Федоров, Т. А. Бычкова // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2021; 4(52): 32-41. DOI <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.4.32>.
19. Гаврилова О.И., Пак К.А. Естественное восстановление леса после пожаров в республике Карелия. *Успехи современного естествознания*. 2017;12:38-44. Режим доступа: <https://elibrary.ru/yumlxe>
20. Галдин В. К., Беспаленко О. Н., Михин В. И. Пирогенные изменения в порослевых дубравах. *Лесотехнический журнал*. 2018;4(32): 58-66. Режимдоступа: <https://elibrary.ru/yqhmvv>.

References

1. Ufimtsev, V.I. Structure of the living ground cover in pine forests on dumps of Kuzbass / V.I. Ufimtsev, T.O. Strelnikova, O.A. Kupriyanov. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2018; 44: 36-58. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988591/44/3>.
2. Rozenberg G.S. Kolichestvenny'e metody` fitocenologii v rabotax B. M. Mirkina i ix sovremennoe sostoyanie [Quantitative methods of phytocenology in the works of B. M. Mirkin and their current state]. *Fitoraznoobrazie Vostochnoj Evropy`*. 2018;3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kolichestvennyye-metody-fitotsenologii-v-rabotah-b-m-mirkina-i-ih-sovremennoe-sostoyanie>.

3. Chernenkova T., Morozova O., Belyaeva N., Puzachenko M. Actual organization of forest communities with broad-leaved trees in broad-leaved-coniferous zone (with Moscow Region as an example). *Rastitel'nost' Rossii*. 2018;107-130. DOI:10.31111/vegus/2018.33.107.
4. Telesnina V.M., Semenyuk O.V., Bogatyryov L.G. Svoystva lesny`x podstilk vo vzaimosvyazi s napochvenny`m pokrovom v lesny`x e`kosistemax Podmoskov`ya (na primere UOPE`Cz «Chashnikovo») [Properties of forest litter in relation to the ground cover in the forest ecosystems of the Moscow region (on the example of the UOPEC "Chashnikovo")]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17. Pochvovedenie*. 2017; 4. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/zmirjn>.
5. Forsmark, B. Low and high nitrogen deposition rates in northern coniferous forests have different impacts on aboveground litter production, soil respiration, and soil carbon stocks / B. Forsmark, A. Nordin, N.I. Maaroufi et al. *Ecosystems*. 2020; 23(7): 1423-1436. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00478-8>.
6. Landuyt, D. The functional role of temperate forest understorey vegetation in a changing world / D. Landuyt, E. De Lombaerde, M.P. Perring et al. *Global Change Biology*. 2019; 25 (11): 3625–3641. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14756>.
7. Sergeeva O.V., Muxortova L.V., Krivobokov L.V. Raspredelenie zapasov podstilki i biomassy` zhi-vogo napochvennogo pokrova v severnoj tajge central`noj E`venkii v zavisimosti ot rel`efa [Distribution of litter stocks and biomass of living ground cover in the northern taiga of central Evenkia, depending on the relief]. *Sibirskij lesnoj zhurnal*. 2020;1:38-46. (In Russ.). URL:<https://elibrary.ru/item.asp?id=42400860>.
8. Gill N., Jarvis D., Rogan J., Kulakowski D. Disturbance history modulates how litter and herbaceous cover influence conifer regeneration after fire. *International Journal of Wildland Fire*. 2020;29. DOI:10.1071/WF19028.
9. Kudryavtsev A., Oparin M., Oparina O., Mamaev A., Kovalev, D. State of Split Birch Woods of the Southern Trans-Urals in the Zone of High Anthropogenic Load on Natural Ecosystems. *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2021; 427-441. DOI:10.35885/1684-7318-2020-4-427-441.
10. Splawinski, T. The colonization of young fire-initiated stands by the crustose lichen *Trapeliopsis granulosa* and its potential effect on conifer establishment and stand succession / T. Splawinski, S. Gauthier, N. Fenton et al. *Silva Fennica*. 2018; 52 (1). DOI: <https://doi.org/10.14214/sf.7791>.
11. Jílková, V. Post-fire forest floor succession in a Central European temperate forest depends on organic matter input from recovering vegetation rather than on pyrogenic carbon input from fire / V. Jílková, M. Adámek, G. Angst et al. *Science of the Total Environment*. 2023; 861: 160659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160659>.
12. Ananyev, V.A. Fire severity controls successional pathways in a fire-affected spruce forest in Eastern Fennoscandia / V.A. Ananyev, V. V. Timofeeva, A.M. Kryshen' et al. *Forests*. 2022; 13 (11):1775. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111775>.
13. Baranovski, B. Comparison of commonly used ecological scales with the Belgard Plant Ecomorph System / B. Baranovski, N. Roschina, L. Karnyzoza, I. Ivanko. *BiosystemsDiversity*. 2018; 26 (4): 286-291. DOI: <https://doi.org/10.15421/011843>.
14. Izuchenie bioraznoobraziya nekotoryh lesoparkovyh fitocenozov Rostovskoj aglomeracii [Studying the biodiversity of some forest park phytocenoses of the Rostov agglomeration] / A. A. Nalivajchenko, P. N. Skripnikov, S. N. Gorbov, A. Y. Mateckaya. *Lesotekhnicheskij zhurnal [Forestry Engineering Journal]*. 2022; 12 (4): 169-184. DOI <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/12>.
15. Krasnayakniga Voronezhskoj oblasti, tom 1. Rasteniya, lishajniki, griby` [Red Book of the Voronezh Region, volume 1. Plants, lichens, fungi]. / pod obshh. nauchnoj red. V. A. Agafonova – Voronezh: Centr duxovnogo vrozozhdeniya Chernozemnogo kraya, 2018. – 412 p (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/vzxezq>.
16. Gustafson, E.J. Simulating Growth and Competition on Wet and Waterlogged Soils in a Forest Landscape Model / E.J. Gustafson, B.R. Miranda, A.Z. Shvidenko, B.R. Sturtevant. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2020; 8: 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.598775>.
17. Ribeiro-Kumara, C. How do forest fires affect soil greenhouse gas emissions in upland boreal forests? A review / C. Ribeiro-Kumara, E. Köster, H. Aaltonen, K. Köster. *Environmental Research*. 2020; 184: 109328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109328>.

18. Prihod'ko, O. YU. Estestvennoe lesovozobnovlenie posle vyborochnykh rubok v listvennichnykh lesakh Primorskogo kraja / O. YU. Prihod'ko, O. R. Fedorov, T. A. Bychkova // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. 2021; 4(52): 32-41. DOI <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.4.32>.

19. Gavrilova O.I., Pak K.A. Estestvennoe vosstanovlenie lesa posle pozharov v respublike Kareliya [Natural forest restoration after fires in the Republic of Karelia]. Uspexi sovremennogo estestvoznaniya. 2017;12:38-44. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/ymilxe>.

20. Galdin V. K., Bepalenko O. N., Mixin V. I. Pirogenny'e izmeneniya v poroslevy'x dubravax [Pyrogenic changes in overgrown oak forests]. Lesotekhnicheskij zhurnal. 2018;4(32): 58-66 (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/yqhmvmv>.

Сведения об авторах

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

Попова Анна Александровна – доктор с.-х. наук, профессор кафедры ботаники и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4711-5377>, e-mail: logachevaaa@rambler.ru.

Кондратьева Анастасия Константиновна – ассистент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4711-5377>, e-mail: nasteckomoe@yandex.ru.

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

Климчик Геннадий Яковлевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8518-2154>, e-mail: les@belstu.by

Бельчина Олеся Григорьевна – ассистент кафедры лесоводства. Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8502-2812>, e-mail: belchyna@belstu.by

Information about the authors

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

Anna A. Popova – Dr. Sci. (Agric.), Prof, department Botany and plant physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3765-7164>, e-mail: bot.fiz-rast@yandex.ru.

Anastasia K. Kondratieva – Assistant, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4711-5377>, e-mail: nasteckomoe@yandex.ru.

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

Gennadiy Y. Klimchik – PhD (Agriculture), Docent, Associate Professor, Department of Silviculture. Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8518-2154>; e-mail: les@belstu.by.

Olesya G. Bel'china – Phd student, Department of Silviculture. Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8502-2812>, e-mail: belchyna@belstu.by.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/4>

УДК 630.56:(551.584.5 + 674.031.795.243)



Влияние микроклиматических городских условий на рост *Tilia cordata* Mill. (на примере г. Уфы)

Регина Р. Байтурина^{1,2}✉, aspirant_bsau@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-8156-2165>

Айдар К. Габделхаков¹, aliya201199@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>

Ленара Р. Салимьянова¹, lenara.muhametzyanova@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-4683-7060>

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет», 50-летия Октября, 34, г. Уфа, 450001, Российская Федерация

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Космонавтов, 1, г. Уфа, 450064, Российская Федерация

Биологическое состояние насаждений с контрастными микроклиматическими условиями произрастания в черте города оказывает ориентация улиц по сторонам света и наличие высотных строений. Измерены диаметры ствола ($d_{0,1}$ и $d_{1,3}$), кроны и высота у *Tilia cordata* Mill. ($n = 1312$ деревьев) VII класса возраста, свободно произрастающих на десяти линейных пробных площадях, выделенных в пределах трех улиц города Уфы Республики Башкортостан. Сравнение средних значений биометрических параметров деревьев, растущих на площадях с разным микроклиматом, произведено с помощью критерия Стьюдента ($\alpha=0,05$). В процессе проведения исследований на участках с контрастными микроклиматическими условиями было выявлено, что на рост, развитие и продуктивность зеленых насаждений в условиях города влияет их местоположение, микроклиматические условия. Очень большое значение на рост дерева оказывает ориентация улиц по сторонам света и наличие высотных строений – солнечная или теневая. На теневой стороне в вегетационный период больше влаги и температура воздуха ниже. Кроме того, непосредственная близость деревьев к проезжей части главной улицы города также оказывает серьезное влияние на их состояние. Данные этого исследования позволяют применять их при организации ландшафтного ухода за городскими насаждениями, в том числе липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.).

Ключевые слова: *Tilia cordata* Mill., диаметр ствола, высота дерева, Уфа, зависимость, микроклиматические условия, выбросы, загрязнение, городские условия

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Байтурина, Р. Р. Влияние микроклиматических городских условий на рост *Tilia cordata* Mill. (на примере г. Уфы) / Р. Р. Байтурина, А. К. Габделхаков, Л. Р. Салимьянова // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 54–66. – Библиогр.: с. 62–65 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/4>.

Поступила 15.11.2022. Пересмотрена 24.03.2023. Принята: 07.04.2023. Опубликована онлайн: 15.05.2023.

The influence of microclimatic urban conditions on the growth of *Tilia cordata* Mill. (Ufa city example)

Regina R. Baiturina^{1,2}✉, aspirant_bsau@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-8156-2165>

Aydar K. Gabdelkhakov¹, aliya201199@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>

Lenara R. Salimyanova¹, lenara.muhametzyanova@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0003-4683-7060>

¹Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 50-letiya Otyabrya Str., 34, Ufa, 450001, Russian Federation

²Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Education «Ufa State Petroleum Technological University», Cosmonavtov str., 1, Ufa, 450064, Russian Federation

Abstract

The biological state of plantings with contrasting microclimatic growing conditions within the city limits is influenced by the orientation of streets to the cardinal directions and the presence of high-rise buildings. The trunk diameters ($d_{0,1}$ and $d_{1,3}$) and the height of *Tilia cordata* Mill were measured ($n = 1476$ trees on 12 trial areas) with different age range (within V-X classes), freely growing on twelve linear trial areas allocated within two districts of the Ufa city of the Republic of Bashkortostan. The comparison of the average values of biometric parameters of trees growing in areas with different microclimates was carried out using the Student's test ($\alpha=0.05$). In the process of conducting research on sites with contrasting microclimatic conditions, it was revealed that the growth, development and productivity of green spaces in urban conditions is influenced by their location, microclimatic conditions and air temperature. The orientation of the streets to the cardinal directions and the presence of high-rise buildings - sunny or shady - are very important for the growth of the tree. On the shady side during the growing period there is more moisture and the air temperature is lower. Of great importance for the difference in the diameters of the trees of the objects under consideration is their age. In addition, the immediate proximity of trees to the carriageway of the main street of the city also has a serious impact on their condition. The data of this study allow them to be used in the organization of landscape care for urban plantings, including linden trees.

Keywords: *Tilia cordata* Mill., stem diameter, tree height, Ufa, dependence, micro-climatic conditions, emissions, pollution, urban conditions

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Baiturina R. R., Gabdelkhakov A. A., Salimyanova L. R. (2022) The influence of microclimatic urban conditions on the growth of *Tilia cordata* Mill. (Ufa city example). *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 54-66 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/4>

Received: 15.11.2023 **Revised:** 24.03.2023 **Accepted:** 07.04.2023 **Published online:** 15.05.2023

Введение

Уфа – самый зеленый город-миллионник России, где на одного жителя приходится 202 м² зелёных насаждений. В городе имеется огромное

количество автомобилей, загрязняющих окружающую среду и воздух [1], а также Уфа – промышленный город, что сказывается на росте и структуре произрастающих на его улицах, парках и скверах

деревьев. Специфическая черта городской среды, при воздействии деятельности людей (рекреация, промышленность и т.п.) – сама становится важным фактором воздействия на природу и человека [1, 3, 8]. Значительную роль в экологии городской среды и микроклимата играют зеленые насаждения¹¹. Деревья являются основным компонентом ландшафта города. Они влияют на количество шума, грязи и пыли в воздухе, дыма, газа, пыли, копоти, выделение фитонцидов, выравнивание температуры воздуха, выделяют кислород, поглощают CO₂ [1, 4]. Ощутимо охлаждение микроклимата города и регулирование теплового комфорта на открытом воздухе деревьями [7]. Одним из примеров климато-мелиорации города является размещение зеленых насаждений вдоль улицы у фасада южной экспозиции для благоприятного эффекта в регулировании микроклимата помещений, окна которых выходят на солнечную сторону [6]. Вопросы адаптации видов к городским условиям изучаются исследователями и представляют интерес во всем мире [11, 14, 16]. Экологические условия урбанизированных территорий [13, 15, 20] вынуждают растения к выработке различных биохимических и физиологических адаптационных процессов (стратегий) [15]. Не менее актуален вопрос влияния загрязнения воздуха и почвы на состояние здоровья отдельных видов деревьев в парках и городских лесах [9, 12, 14]. Различные признаки растений широко используются для оценки состояния окружающей среды [13]. Проводятся исследования по видам деревьев, которые являются наиболее подходящими для посадки в условиях прогнозируемого будущего городского климата [18]. К их числу относится липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.) [2,4,5] как ценное дерево, которое часто высаживают в городских зеленых насаждениях [13, 17, 18].

Неблагоприятные особенности городской среды заметно изменяют состояние древесных растений и отражаются как на отдельных физиологических и морфологических показателях, так и на

общем облике, его долговечности, сопротивляемости неблагоприятным воздействиям.

В условиях увеличения техногенных нагрузок санитарно-гигиеническая роль покрытых растительностью пространств города является мощным средством нейтрализации вредных последствий техногенного загрязнения для городского населения. Природные, озелененные территории, а также акватории, влияют на микроклиматические характеристики городской среды, в том числе задерживают десятки тонн пыли, концентрируют в листьях тяжелые металлы, участвуют в формировании температурно-влажностных режимов, химического состава воздуха, биотрансформируют и рассеивают сотни тысячи тонн загрязняющих веществ [19], обогащают воздух кислородом. Они оказывают воздействие на скорость движения воздушных потоков, уровень инсоляции поверхностей на уровне земли, зданий и сооружений, а также снижают шумовую нагрузку от автомобилей и других источников.

Для того чтобы зеленые насаждения города могли обеспечивать свою функцию по защите атмосферы от загрязнения в полной мере, на каждого горожанина должно приходиться 300 м² лесов, в том числе 50 м², непосредственно в черте города, а остальные вокруг него.

На сегодняшний день содержание объектов зеленого хозяйства на территории г. Уфы проводит МБУ «Горзеленхоз», которое представляет собой крупнейшее учреждение сферы жилищно-коммунального хозяйства столицы республики. На его содержании находятся 103 городских объекта площадью 276 га, в том числе 11 парков, 41 сквер, 3 сада, 24 улицы, 1 транспортная развязка, 2 бульвара, 21 прилегающая территории, 23 фонтана, 1 водоем, 54 памятных сооружения, питомник (60 га), 21767 га городских лесов и вольерное хозяйство (<http://ufagreen.ru/>).

Природно-климатические условия объекта исследований вполне благоприятны для произрастания хвойных и мягких лиственных видов, включая липу. Твердые лиственные виды (дуб, клен, вяз, ильм), несмотря на относительно богатые лесные почвы, не имеют хороших условий для успешного произрастания, так как сумма положительных тем-

¹¹ Гизатуллина, Г. И. Лесоводственно-экологическая характеристика насаждений общего пользования в г. Уфе: автореф. дис. канд. с.-х. наук. Уфа: БашГАУ. 2018. 24 с.

ператур для них недостаточна [3], что подтверждается относительно низкими бонитетами¹² этих насаждений. Периодически суровые морозы, засухи, систематическое затопление паводковыми водами в поймах рек Белой, Уфы и Демы в сочетании с другими неблагоприятными факторами оказывают отрицательное влияние на рост и состояние насаждений, представленных твердыми лиственными породами [1].

Целью исследования является оценка влияния условий местопроизрастания и микроклиматических условий на биометрические показатели деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), что вызывает интерес у специалистов и является актуальным вопросом на сегодня.

В соответствии с целью исследований были сформулированы задачи:

- сравнить биометрические показатели липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), заложенных на пробных площадях, оценить состояние деревьев;

- на основании полученных данных и используя данные предшествующих исследований, сделать выводы о влиянии факторов на рост *T. cordata*.

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Рассматривались только деревья свободного роста. В качестве объектов исследования были выбраны деревья на трех улицах Советского района города Уфы (табл. 1). Деревья на этих улицах высаживались в период с 1967 по 1972 гг. 10-15-летними саженцами и отнесены нами к VII классу возраста (биологический возраст 65-70 лет). Пробные площади (ПП) располагаются в центральной части города по ул. Проспект Октября, протянувшейся с юго-западного в северо-восточном направлении, улиц Братьев Кадомцевых и 50 лет СССР, ориентированных перпендикулярно ул. Проспект Октября. Различие объектов заключается в ориентированности улиц по отношению к сторонам света и обуславливается разной освещенностью деревьев, а по ул. Проспект Октября предусматривает по-

вторность вариантов.

Уфимский район представляет собой связующий центр перерабатывающих предприятий, при этом страдает экология города. Так, например, средние за год концентрации специфических веществ как ксиолов – 0,009 мг/м³, толуола – 0,056 мг/м³, остальных примесей – ниже допустимых норм. Объем выбросов загрязняющих веществ в 2019 году составил от стационарных источников – 175,6 тыс. т., от передвижных источников – 127,1 тыс. т. [1, 8].

Сбор данных

Сбор материалов проведен камеральным и полевым способом. Использованы лесоводственно-таксационные приемы¹³, таксационные описания, план лесонасаждений, проектные ведомости, литературные источники, документы МБУ «Горзеленхоз» и другие документы.

Диаметры в коре с точностью до 1 см измеряли мерной вилкой на высоте до 10 см ($d_{0,1}$) и 1,3 м ($d_{1,3}$) от шейки корня. Также рассматривался сбеги ствола как разница между этими замерами. Диаметры раздвоенных стволов определяли по положению развилки относительно высоты 1,3 м: если развилка выходила выше 1,3 м, то это одно дерево, а если ниже, то два/три и т.д. [8]. В городе отмечаются многоствольные деревья липы мелколистной – были обнаружены деревья даже с 8 стволами. Высотомером с градацией 0,5 м на каждой ПП были измерены высоты 15-33 деревьев, представленных разными ступенями толщины.

Оценивались также такие биометрические показатели, как диаметр кроны и качественные характеристики дерева: обрезка ветвей, поврежденность ствола (в т.ч. механические повреждения), декоративность, заболевания листьев и ствола, болезни.

С помощью прибора экологического контроля ДТ-9881М проведено измерение содержания взвешенных твердых частиц с точностью 50 % при 0,3 мкм и 100 % для частиц > 0,45 мкм на уровне

¹²Лесохозяйственный регламент Уфимского лесничества. Уфа, 2018. 185 с. URL: <https://forest.bashkortostan.ru/documents/active/> (дата обращения: 27.09.2022).

¹³Сальникова, И. С. Таксация леса: учебное пособие / И. С. Сальникова, Г. В. Анчугова, З. Я. Нагимов. Екатеринбург, 2017. 72 с. ISBN: 978-5-94984-615-5. Режим доступа <https://elibrary.ru/sdyhje>.

1,3 м от поверхности почвы. Учитывались значения температуры и относительной влажности воздуха. Для определения уровня освещенности (Е, лк) использовался Люксметр “ТКА-ЛЮКС”.

Анализ данных

Статистическая обработка материалов была выполнена стандартными методами вариационной статистики с применением программ Microsoft Excel и StatSoft Statistica. Сравнение средних зависимых выборок при количественной изменчивости проводилось на основе t-критерия Стьюдента при уровне значимости $\alpha=0,05$.

Результаты и обсуждение

Исследования «выявили зависимость содержания взвешенных твердых частиц PM_{2.5}/PM₁₀ от интенсивности движения автотранспорта. Примечательно, что тесной связи между количеством автотранспорта и концентрацией мелкодисперсных пылевых частиц в насаждениях не выявлено. Следовательно, древесные посадки служат мощным фильтрующим барьером для загрязнителей вдоль автомагистралей, в том числе вследствие значительного уменьшения содержания PM_{2.5}/PM₁₀ в составе атмосферного воздуха» [1]. Фенологические наблюдения¹⁴ за *T. cordata* Mill. показали, что на объектах исследования (Советский район г. Уфы) фазы распускания листовых почек и облиствения зафиксированы в апреле с середины до 20-х чисел, цветения - с 25 июня до 5 июля, плодоношения с 16 по 24 июля, начало листопада с 25 августа по 10 октября. Согласно исследованиям в магистральных посадках у деревьев первой величины наиболее выражено сокращение продолжительности цветения, наблюдается более поздний окрас листвы осенью и опад листвы на 4-14 дней по сравнению с озелененными участками за чертой города. Предположительно причинами сдвига феноритмов¹⁵ растений могут послужить более теп-

лый микроклимат и дополнительное освещение. Представляет интерес влияние городских условий на деревья с точки зрения негативного влияния на их жизненное состояние [10] по оценке конкретных биометрических показателей.

T. cordata преобладает в озеленении г. Уфы, в том числе и на рассмотренных объектах. На исследованных ПП деревья были высажены одновременно. Это позволяет, в определенной степени, оценить их рост и развитие на фоне влияния урбанизированной среды.

Следует отметить, что большинство обследованных нами деревьев имеют механические повреждения стволов в нижней части, кроны всех деревьев подвержены обрезке.

Средние высоты деревьев исследованных объектов (табл. 1) составили от 11,5 (ПП2) до 16,5 м (ПП3), при этом высоты отдельных экземпляров варьируют от 5 до 22 м. Для большинства ПП (кроме ПП 2 и 8) на световой стороне улицы средняя высота зеленых насаждений выше, чем на теневой. Среднеквадратические средние $d_{1,3}$ максимальное значение в 38 см имеют ПП5 и ПП9, минимальное значение в 27 см – ПП6. Варьирование $d_{0,1}$ и $d_{1,3}$ – среднее и составляет 16-38 %, в то время как для сбегса – значительное (56-101 %). Показатель точности опыта для замеров диаметров допустимый и не превышает 4 %, а для сбегса, учитывая сильную закомелистость многих стволов, приемлемый – находится в пределах 5-9 %. Рис. 1 наглядно показывает различие средних показателей $d_{0,1}$ и $d_{1,3}$ и их статистик по ПП. Например, четко видно, что вариационный размах для $d_{0,1}$ шире, чем для $d_{1,3}$ (кроме ПП 1 и 10). Данная тенденция характерна и для межквартильного размаха, который изменяется от 7 до 12 см для $d_{1,3}$ и от 10 до 15 см для $d_{0,1}$. Распределения $d_{0,1}$ для ПП 4 и 9, $d_{1,3}$ для ПП 3 и 5 характеризуются отрицательной асимметрией, для остальных ПП – положительной. Варьирование изучаемых параметров объясняется не только внутривидовой изменчивостью, внешними воздействиями в виде повреждений и обрезки, микроклиматическими условиями местопроизрастания, но и наличием деревьев более молодого поколения в результате восстановительных посадок, взамен погибших экземпляров (например, на ПП4).

¹⁴ Кулагин, А.А., Николаева В.В. Фенологические наблюдения за *Tilia cordata* Mill. на территории г. Уфы» / А. А. Кулагина, В. В. Николаева // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 4. С. 150-153.

¹⁵ Бухарина, И.Л., Поварнишина, Т.М., Ведерников, К.Е. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде: монография / И.Л. Бухарина, Т.М. Поварнишина, К.Е. Ведерников. – Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2007. – 216 с.

Средние арифметические значения $d_{1,3}$ для исследуемых ПП практически совпадают со значениями моды и медианы, незначительные величины коэффициентов асимметрии и эксцесса – свидетельствует о соответствии их рядов распределений нормальному закону. Для $d_{0,1}$ и сбег большинства рассмотренных объектов значения мер косости и крутости лежат за пределами своих двухкратных

основных ошибок, показывая различие распределений выборок от нормального. Дальнейший анализ соответствия изучаемых выборок нормальному закону распределения по критериям Колмогорова-Смирнова, Лиллиефорса и Шапиро-Уилкса показал их отличие не только для $d_{0,1}$ и сбег, но и части $d_{1,3}$ ПП.

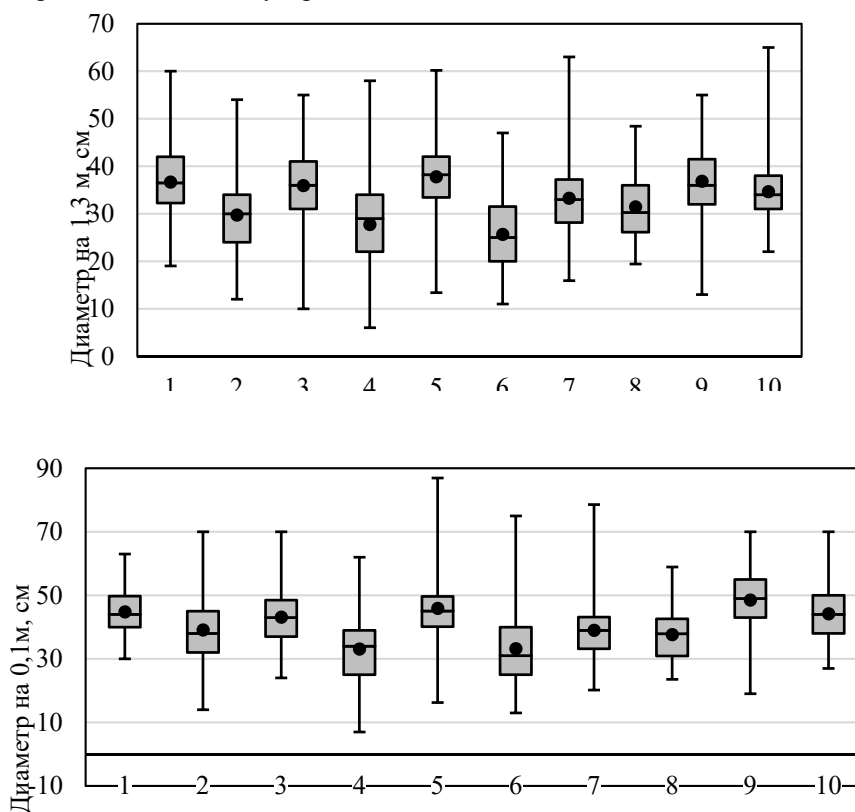


Рисунок 1 Диаметры деревьев на высоте 1,3 м (верхний) и 0,1 (нижний) ПП (1-10): прямоугольник представляет межквартильный размах, точка – средняя арифметическая, черта – медиана, усы – минимальное и максимальное значения наблюдаемых признаков

Figure 1. Tree diameters at a height of 1.3 m (upper) and 0.1 (lower) PP (1-10): the rectangle represents the interquartile span, the dot is the arithmetic mean, the dash is the median, the whiskers are the minimum and maximum values of the observed features

Источник: собственная разработка авторов

Source: author's composition

Природопользование

Таблица 1

Характеристика пробных площадей для исследования влияния микроклимата на рост *Tilia cordata* Mill.

Table 1

Characteristics of trial areas for the study of the influence of microclimate on the growth of *Tilia cordata* Mill.

Шифр пробной площади	Место расположения пробной площади	Средняя высота деревьев, м	Средний диаметр, см	Расстояние между рядами, м	Среднее расстояние между деревьями в ряду, м	Количество обследованных деревьев, экз.	Средние значения			Концентрация выбросов РМ, µg/m ³	
							освещенность, лк	температура, °С	влажность, %		
1	четная сторона ул. Братьев Кадомцевых	12,0	37	8	5	70				2,5	10
2	нечетная сторона ул. Братьев Кадомцевых	11,5	31	7	5	200	1086	21,1	13,0	12	50
3	нечетная сторона ул. Проспект Октября между остановками «Универмаг Уфа» и «Спортивная»	16,5	37	7	5	187	1337	20,9	12,9	33	52
4	четная сторона ул. Проспект Октября между остановками «Универмаг Уфа» и «Спортивная»	15,5	30	5	5	105	1355	20,4	12,4	18	89
5	нечетная сторона ул. Проспект Октября от остановки «Спортивная» до ул. Шафиева	15,0	38	6	5	196	1175	20,6	12,8	13	66
6	четная сторона ул. Проспект Октября от остановки «Спортивная» до ул. Шафиева	14,5	27	6	4	107	1030	20,8	12,8	12	65
7	нечетная сторона ул. Проспект Октября от ул. Шафиева до остановки «Госцирк»	12,0	34	4	4	179	1159	20,7	12,7	9	35
8	четная сторона ул. Проспект Октября от ул. Шафиева до остановки «Госцирк»	14,5	32	12	4	84	1269	19,7	12,2	5	27
9	четная сторона ул. 50 лет СССР (между улицами Зорге и Проспект Октября)	13,5	38	8	4	91	1439	20,2	10,8	19	62
10	нечетная сторона ул. 50 лет СССР (между улицами Зорге и Проспект Октября)	15,5	35	6	4	93	1176	19,7	12,1	8	31

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Природопользование

Таблица 2

Критерии различия парного сравнения параметров *T. cordata*

Table 2

Criteria for the difference of paired comparison of *T. cordata* parameters

ПП	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметры на высоте до 10 см ($d_{0,1}$) Diameters at a stem height of up to 10 cm										
1	-	7,00	0,20	9,61	1,56	8,72	2,02	5,4	3,29	0,47
2	<0,01	-	4,46	3,64	6,58	4,00	0,18	0,77	9,33	5,11
3	0,84	<0,01	-	8,88	2,98	9,31	4,98	5,64	3,18	0,28
4	<0,01	<0,01	<0,01	-	8,51	0,14	4,05	4,43	10,05	7,98
5	0,12	<0,01	<0,01	<0,01	-	9,56	7,96	7,53	1,72	1,60
6	<0,01	<0,01	<0,01	0,89	<0,01	-	4,85	3,86	10,74	8,08
7	<0,05	0,86	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	2,71	5,71	2,80
8	<0,01	0,44	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	9,42	5,06
9	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,09	<0,01	<0,01	<0,01	-	3,62
10	0,64	<0,01	0,78	<0,01	0,11	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-
Диаметры на высоте 1,3 м ($d_{1,3}$) Diameters at a stem height of up to 1,3 m										
1	-	6,87	1,40	8,14	2,04	11,01	0,92	4,01	0,79	1,72
2	<0,01	-	9,62	1,25	11,35	4,09	4,99	3,33	8,53	5,84
3	0,17	<0,01	-	8,60	2,87	13,41	4,24	6,53	0,97	3,39
4	<0,01	0,21	<0,01	-	8,70	1,75	5,20	4,18	7,15	6,26
5	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	-	12,85	6,69	8,05	1,91	4,55
6	<0,01	<0,01	<0,01	0,08	<0,01	-	8,80	6,72	10,69	9,42
7	0,36	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	3,50	2,10	0,02
8	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	5,27	2,70
9	0,43	<0,01	0,33	<0,01	0,06	<0,01	0,04	<0,01	-	2,15
10	0,09	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,98	<0,01	0,03	-
Сбор ($d_{0,1} - d_{1,3}$)										
1	-	0,19	1,65	3,77	0,29	0,17	1,26	2,37	3,57	1,44
2	0,85	-	2,40	4,29	4,24	1,99	2,51	5,73	3,79	0,92
3	0,10	0,02	-	2,71	1,26	0,01	2,44	0,07	4,93	3,79
4	<0,01	<0,01	0,01	-	2,84	3,14	0,28	1,54	7,04	5,73
5	0,77	<0,01	0,21	0,61	-	0,51	3,32	1,59	4,25	2,51
6	0,87	0,05	0,99	<0,01	<0,01	-	2,54	2,26	3,82	1,99
7	0,21	0,01	0,02	0,78	<0,01	0,01	-	0,06	5,29	4,24
8	0,02	<0,01	0,94	0,13	0,12	0,03	0,95	-	5,83	4,29
9	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	2,40
10	0,16	0,36	<0,01	<0,01	0,01	0,05	<0,01	<0,01	0,02	-

Примечание: правая верхняя половина – t-критерий, левая нижняя половина – уровень их значимости.

Полужирным шрифтом выделены незначимые различия

Note: the upper right half is the t-criteria, the lower left half is the level of their significance. Minor differences are highlighted in bold

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

С учетом этого попарное сравнение средних зависимых выборок при количественной изменчивости произведено по критерию Стьюдента (табл. 2). По ул. Братьев Кадомцевых и ул. 50 лет СССР диаметры деревьев по нечетной стороне улицы значимо отличаются от диаметров четной стороны (освещены меньше и влаги больше), причем по четной стороне улицы деревья толще, возможно, это объясняется оптимальными условиями для липы как теневыносливого вида. При сравнении параметров деревьев на этих двух улицах необходимо отметить большие значения для ПП 9 и 10, где улица гораздо шире по сравнению с ПП 1 и 2. Причем по ул. Братьев Кадомцевых деревья липы на порядок больше и по нечетной (световой) стороне они высажены в 2-3 ряда. Сравнение диаметров лип на 0,1 м и 1,3 м по ул. Проспект Октября также показало существенное различие между световыми и теневыми сторонами улицы ($t < t_{st}$). На нечетной (световой) стороне улицы (ПП 3, 5 и 7) деревья толще, сбег сильнее (кроме ПП 7 и 8). По нечетной стороне улицы липы высажены дальше от проезжей части дороги в два ряда, по сравнению с четной стороной, и образуют пешеходную аллею. Сравнение $d_{0,1}$ и $d_{1,3}$ отдельно для четной (ПП 4, 6 и 8) и нечетной (ПП 3, 5 и 7) стороне улицы тоже показали статистически значимые различия. Для сбega стволов различия выражены не для всех случаев наблюдений.

Концентрация загрязняющих веществ зависит от техногенных и погодных условий. Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ для населения и растительности существенно различаются, которые необходимо учитывать при проектировании городских зеленых насаждений. Концентрация выбросов на нечетной (световой) стороне ПП1 по ул. Братьев Кадомцевых на порядок выше РМ 2,5, по сравнению с РМ 10 – где разница составила $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Освещенность превышает на 200 лк, чем на теневой стороне, при

этом температура и влажность ниже. Такие же изменения наблюдаются на ПП 3 и 4. На остальных участках освещенность зафиксирована выше по четной стороне улиц. Наибольшая концентрация РМ 10 зафиксирована по ул. Проспект Октября между остановками «Универмаг Уфа» и «Спортивная», где наблюдается большой поток автомобилей в течение всего дня – более 10 тыс. машин за сутки. Динамика средних показателей влажности и температуры воздуха на ПП 5-10 отличаются незначительно, что объясняется вне-вегетационным (весенним) периодом. Измерения проведены в апреле месяце, при установлении стабильных положительных температур. Авторами планируется продолжение изучения микроклиматических условий в вегетационный период и последующий их анализ.

Заключение

В процессе проведения исследований на участках с контрастными микроклиматическими условиями было выявлено, что на рост, развитие зеленых насаждений в условиях города влияет их местоположение, микроклиматические условия, температура воздуха. Очень большое значение на рост дерева оказывает ориентация улиц по сторонам света и наличие высотных строений – солнечная или теневая. На теневой стороне больше влаги и температура воздуха ниже. Кроме того, непосредственная близость деревьев к проезжей части главной улицы города также оказывает серьезное влияние на их состояние. Проспект Октября – одна из самых загруженных улиц города и по ней проезжает более 10 тыс. машин за сутки. Таким образом, на рост зеленых насаждений оказывают влияние факторы, изменяющие среду их обитания на локальном уровне. Данные этого исследования позволяют применять их при организации ландшафтного ухода за городскими насаждениями липы (*T. Cordata* Mill.).

Список литературы

1. Байтурина, Р. Р. Концентрация мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе городских насаждений (на примере г. Уфа) / Р. Р. Байтурина // Успехи современного естествознания. 2022. № 5. С. 7-11 DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37817>.
2. Салтан, Н. В. Эколого-биологические особенности *Tilia cordata* Mill. в урбанизированной среде Кольского Севера (на примере Г. Мурманск) / Н. В. Салтан, Е. А. Святковская, Н. Н. Тростенюк // Известия

Самарского научного центра Российской академии наук. – 2019. – Т. 21, № 2-2(88). – С. 180-184. Режим доступа: <https://elibrary.ru/zkdkto>.

3. Галимова, Р. Г. Климат Республики Башкортостан / Р. Г. Галимова. – Уфа : Башкирский государственный университет, 2017. – 96 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/yvmqnu>.

4. Мамиева, Е. Б. Оценка устойчивости фотосинтетического аппарата липы мелколистной *Tilia cordata* mill. в градиенте техногенного загрязнения г. Владикавказ / Е. Б. Мамиева, Л. В. Ширнина, В. Т. Попова // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 30-42. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/3>.

5. Исяньюлова, Р. Р. Липа мелколистная как одна из преобладающих пород в составе насаждений Республики Башкортостан / Р. Р. Исяньюлова, Э. Н. Талипов // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2019. – № 1(157). – С. 50-54. Режим доступа: <https://elibrary.ru/zcssyp>.

6. Попова, И.В. Оценка роли зеленых насаждений в формировании комфортных микроклиматических условий в летний период / И.В. Попова, Е.Э. Бурак, Ю.А. Воробьева // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2019. № 2. С. 47-55. Режим доступа: <https://elibrary.ru/wjnetn>.

7. Deng, J., Pickles, B.J., Kavakopoulos, A., Blanusa, T., Halios, C.H., Smith, S.T., Shao, L. Concept and methodology of characterising infrared radiative performance of urban trees using tree crown spectroscopy (2019) Building and Environment, 157: 380-390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.056>.

8. Erofeeva, E.A. Estimating the frequency of hormesis and other non-monotonic responses in plants experiencing road traffic pollution in urban areas and experimental pollutant exposure (2020) Environmental Monitoring and Assessment, 192 (7): 460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08418-8>.

9. Gabdelkhakov A. Estimation of diameters by stump measurements for natural and artificial small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) / A. Gabdelkhakov, L. Blonskaya, I. Sabirzyanov, R. Baiturina, I. Mullagaliev // International Journal of Agriculture and Biology. 2021. Т. 26. № 4. P. 416-468. DOI: <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1857>.

10. Krzyżaniak, M., Świerk, D., Antoszewski, P. Factors influencing the health status of trees in parks and forests of urbanized areas (2021) Forests, 12 (6): 656. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12060656>.

11. Martynova M. Effectiveness of tending activities in broadleaved forests / M. Martynova, R. Sultanova, L. Blonskaya, A. Gabdelkhakov, E. Volkova, G. Odintsov // Journal of Environmental Accounting and Management. – 2021. Т. 9. № 4. P. 319-330. DOI: <https://doi.org/10.5890/JEAM.2021.12.001>.

12. Möller, T., Oldeland, J., Schultz, M. The value of alien roadside trees for epiphytic lichen species along an urban pollution gradient (2021) Journal of Urban Ecology, 7 (1). DOI: <https://doi.org/10.1093/jue/juab025>.

13. Pietras-Couffignal, K., Robakowski, P. The impact of air pollution on growth features and the health of trees in Berlin (2019) Dendrobiology, 82, pp. 52-65. DOI: <https://doi.org/10.12657/denbio.082.006>.

14. Skrypnik, L., Maslennikov, P., Feduraev, P., Pungin, A., Belov, N. Ecological and landscape factors affecting the spread of European mistletoe (*Viscum album* L.) in urban areas (a case study of the Kaliningrad city, Russia) (2020) Plants, 9 (3), Article № 394. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9030394>.

15. Straigtė, L., Vaidelys, T., Žalkauskas, R., Manton, M. Impact of urban green spaces, native tree species and seasons on soil pH in Kaunas, Lithuania (2019) Baltic Forestry, 25 (2), pp. 257-262. DOI: <https://doi.org/10.46490/vol25iss2pp257>.

16. Šuškalo, N., Hasanagić, D., Topalić-Trivunović, L., Kukrić, Z., Samelak, I., Savić, A., Kukavica, B. Antioxidative and antifungal response of woody species to environmental conditions in the urban area (2018) Ecotoxicology, 27 (8), pp. 1095-1106. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-018-1963-z>.

17. Czaja, M. The Complex Issue of Urban Trees—Stress Factor Accumulation and Ecological Service Possibilities / M. Czaja, A. Kołton, P. Muras // Forests. 2020; 11 (9): 932. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11090932>.

18. Weryszko-Chmielewska, E., Piotrowska-Weryszko, K., Dąbrowska, A. Response of *Tilia sp.* L. to climate warming in urban conditions – Phenological and aerobiological studies (2019) *Urban Forestry and Urban Greening*, 43, Article № 126369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126369>.

19. Zhang, J., Ghirardo, A., Gori, A., Albert, A., Buegger, F., Pace, R., Georgii, E., Grote, R., Schnitzler, J.-P., Durner, J., Lindermayr, C. Improving Air Quality by Nitric Oxide Consumption of Climate-Resilient Trees Suitable for Urban Greening (2020) *Frontiers in Plant Science*, 11, 549913. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.549913>.

20. Andrianjara, I. Urban tree management: Diversity of *Tilia* genus in streets and parks of Paris based on morphological and genetic characteristics / I. Andrianjara, M. Bordenave-Jacquemin, V. Roy et al. // *Urban Forestry & Urban Greening*. – 2021. – Vol. 66. – P. 127382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127382>.

References

1. Baiturina, R.R. Koncentraciya melkodispersnyh chastic v atmosfernom vozduhe gorodskih nasazhdenij (na primere g.Ufa) [The concentration of fine particles in the atmospheric air of urban plantings (on the example of Ufa)] / R.R. Bajturina // *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2022. №5. S. 7-11 DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37817> (In Russian).

2. Saltan, N. V. Ekologo-biologicheskie osobennosti *Tilia cordata* Mill. v urbanizirovannoj srede Kol'skogo Severa (na primere G. Murmansk) / N. V. Saltan, E. A. Svyatkovskaya, N. N. Trostenyuk // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. – 2019. – T. 21, № 2-2(88). – С. 180-184. URL: <https://elibrary.ru/zkdkto>.

3. Galimova, R. G. *Klimat Respubliki Bashkortostan* / R. G. Galimova. – Ufa : Bashkirskij gosudarstvennyj universitet, 2017. – 96 с. URL: <https://elibrary.ru/yvmqnu>.

4. Mamieva, E. B. Ocenka ustojchivosti fotosinteticheskogo apparata lipy melkolistnoj *Tilia cordata* mill. v gradiente tekhnogennoho zagryazneniya g. Vladikavkaz / E. B. Mamieva, L. V. SHirmina, V. T. Popova // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – T. 12, № 2(46). – С. 30-42. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/3>.

5. Isyan'yulova, R. R. Lipa melkolistnaya kak odna iz preobladayushchih porod v sostave nasazhdenij Respubliki Bashkortostan / R. R. Isyan'yulova, E. N. Talipov // *Ispol'zovanie i ohrana prirodnyh resursov v Rossii*. – 2019. – № 1(157). – С. 50-54. Режим доступа: <https://elibrary.ru/zessyp>.

6. Popova, I.V. i dr. Ocenka roli zelenykh nasazhdenij v formirovanii komfortnykh mikroklimaticheskikh uslovij v letnij period / I.V. Popova, E.E. Burak, YU.A. Vorob'eva // *Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*. Ser.: Estestvennye i medicinskie nauki. 2019. № 2. S. 47-55. URL: <https://elibrary.ru/wjnetn>.

7. Deng, J., Pickles, B.J., Kavakopoulos, A., Blanusa, T., Halios, C.H., Smith, S.T., Shao, L. Concept and methodology of characterising infrared radiative performance of urban trees using tree crown spectroscopy (2019) *Building and Environment*, 157: 380-390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.056>.

8. Erofeeva, E.A. Estimating the frequency of hormesis and other non-monotonic responses in plants experiencing road traffic pollution in urban areas and experimental pollutant exposure (2020) *Environmental Monitoring and Assessment*, 192 (7): 460. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08418-8>.

9. Gabdelkhakov A. Estimation of diameters by stump measurements for natural and artificial small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) / A. Gabdelkhakov, L. Blonskaya, I. Sabirzyanov, R. Baiturina, I. Mullagaleev // *International Journal of Agriculture and Biology*. 2021. T. 26. № 4. P. 416-468. DOI: <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.1857>.

10. Krzyżaniak, M., Świerk, D., Antoszewski, P. Factors influencing the health status of trees in parks and forests of urbanized areas (2021) *Forests*, 12 (6): 656. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12060656>.

11. Martynova M. Effectiveness of tending activities in broadleaved forests / M. Martynova, R. Sultanova, L. Blonskaya, A. Gabdelkhakov, E. Volkova, G. Odintsov // *Journal of Environmental Accounting and Management*. – 2021. T. 9. № 4. P. 319-330. DOI: <https://doi.org/10.5890/JEAM.2021.12.001>.

12. Möller, T., Oldeland, J., Schultz, M. The value of alien roadside trees for epiphytic lichen species along an urban pollution gradient (2021) *Journal of Urban Ecology*, 7 (1). DOI: <https://doi.org/10.1093/jue/juab025>.

13. Pietras-Couffignal, K., Robakowski, P. The impact of air pollution on growth features and the health of trees in Berlin (2019) *Dendrobiology*, 82, pp. 52-65. DOI: <https://doi.org/10.12657/denbio.082.006>.
14. Skrypnik, L., Maslennikov, P., Feduraev, P., Pungin, A., Belov, N. Ecological and landscape factors affecting the spread of European mistletoe (*Viscum album* L.) in urban areas (a case study of the Kaliningrad city, Russia) (2020) *Plants*, 9 (3), Article № 394. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9030394>.
15. Straigtė, L., Vaidelys, T., Žalkauskas, R., Manton, M. Impact of urban green spaces, native tree species and seasons on soil pH in Kaunas, Lithuania (2019) *Baltic Forestry*, 25 (2), pp. 257-262. DOI: <https://doi.org/10.46490/vol25iss2pp257>.
16. Šuškalo, N., Hasanagić, D., Topalić-Trivunović, L., Kukrić, Z., Samelak, I., Savić, A., Kukavica, B. Antioxidative and antifungal response of woody species to environmental conditions in the urban area (2018) *Ecotoxicology*, 27 (8), pp. 1095-1106. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-018-1963-z>.
17. Czaja, M. The Complex Issue of Urban Trees—Stress Factor Accumulation and Ecological Service Possibilities / M. Czaja, A. Kołton, P. Muras // *Forests*. 2020; 11 (9): 932. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11090932>.
18. Weryszko-Chmielewska, E., Piotrowska-Weryszko, K., Dąbrowska, A. Response of *Tilia* sp. L. to climate warming in urban conditions – Phenological and aerobiological studies (2019) *Urban Forestry and Urban Greening*, 43, Article № 126369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126369>.
19. Zhang, J., Ghirardo, A., Gori, A., Albert, A., Buegger, F., Pace, R., Georgii, E., Grote, R., Schnitzler, J.-P., Durner, J., Lindermayr, C. Improving Air Quality by Nitric Oxide Consumption of Climate-Resilient Trees Suitable for Urban Greening (2020) *Frontiers in Plant Science*, 11, 549913. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.549913>.
20. Andrianjara, I. Urban tree management: Diversity of *Tilia* genus in streets and parks of Paris based on morphological and genetic characteristics / I. Andrianjara, M. Bordenave-Jacquemin, V. Roy et al. // *Urban Forestry & Urban Greening*. – 2021. – Vol. 66. – P. 127382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127382>.

Сведения об авторах

✉ *Байтурина Регина Рафаиловна* – кандидат биол. наук, доцент, доцент кафедры лесоводства и ландшафтного дизайна, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», ул. 50-летия Октября, 34, г. Уфа, Российская Федерация, 450001 | старший научный сотрудник лаборатории искусственных систем декарбонизации и лаборатории климатических изменений и углеродного баланса экосистем ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Космонавтов, 1, г. Уфа, Российская Федерация, 450064; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8156-2165>, e-mail: aspirant_bsau@mail.ru.

Габделхаков Айдар Кавилович – кандидат с.-х. наук, доцент, доцент кафедры лесоводства и ландшафтного дизайна, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», ул. 50-летия Октября, 34, г. Уфа, Российская Федерация, 450001, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>, e-mail: aliya201199@mail.ru.

Салимьянова Ленара Рушановна – аспирант кафедры лесоводства и ландшафтного дизайна, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», ул. 50-летия Октября, 34, г. Уфа, Российская Федерация, 450001, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4683-7060>, e-mail: lenara.muhametzyanova@gmail.com.

Information about the authors

✉ *Regina R. Baiturina* – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor of Forestry and Landscape Design Department, Bashkir State Agrarian University, 50-letiya Otyabrya Str., 34, Ufa, Russian Federation, 450001 | Head of the Laboratory of Artificial Decarbonization Systems and Laboratory of Climate Change and Ecosystem Carbon Balance, Ufa State Petroleum Technological University, Cosmonauts Str., 1, Ufa, 450064, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8156-2165>, e-mail: aspirant_bsau@mail.ru

Природопользование

Aydar K. Gabdelkhakov – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor of Forestry and Landscape Design Department, Bashkir State Agrarian University, 50-letiya Otyabrya Str., 34, Ufa, 450001, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7129-880X>, e-mail: aliya201199@mail.ru,

Lenara R. Salimyanova – postgraduate student of Forestry and Landscape Design Department, Bashkir State Agrarian University, 50-letiya Otyabrya Str., 34, Ufa, 450001, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4683-7060>, e-mail: lenara.muhametzyanova@gmail.com

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/5>

УДК 630*2




Таксационная структура насаждений сосны брутильской (*Pinus brutia* TEN.) в Сирии в зависимости от орографических условий

Наталья В. Беляева¹ ✉, galbel06@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-8673-2824>

Артур И. Новиков³, arthur.novikov@vglta.vrn.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Дмитрий А. Данилов^{1,2}, stown200@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7504-5743>

Самер Алкинж^{1,4}, sameralkinj@gmail.com  <https://orcid.org/0009-0007-8672-7719>

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

²Ленинградский НИИСХ «Белогорка» – филиал ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха», ул. Институтская, 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, 188338, Российская Федерация

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8., г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

⁴Тишринский университет, г. Латакия, Сирия

Искусственные насаждения сосны брутильской (*Pinus brutia* TEN.) в условиях двух регионов Сирии – провинций Латакии и Тартуса – произрастают на разной высоте над уровнем моря. На объектах исследования закладывали учетные площадки постоянного радиуса размером 400 кв. м, расположенные по площади таким образом, чтобы охватить статистическую изменчивость изучаемых таксационных показателей. Ряды распределения стволов деревьев на высоте 1,3 м ранжировались через 5 см с анализом показателей асимметрии и эксцесса ранговых рядов. Таксационные показатели высот и диаметров стволов деревьев сосны брутильской (*P. brutia* TEN.) в ее плантациях имеют различную по силе прямую корреляцию как с высотой участка над уровнем моря, так и с количеством осадков. Показатель запаса насаждения имеет наибольшую прямую корреляцию с высотой участка над уровнем моря и количеством осадков, в сравнении с показателем среднего диаметра насаждений сосны брутильской (*P. brutia* TEN.). Ранговая структура диаметров стволов сосны брутильской (*P. brutia* TEN.) имеет свои коренные отличия, связанные с размещением участков произрастания над уровнем моря. С увеличением высоты над уровнем моря участка плантации в насаждении увеличивается количество деревьев с более крупными стволами. Анализ асимметрии и эксцессов рядов распределения диаметров стволов сосны брутильской (*P. brutia* TEN.) выявил, что снижение конкурентной нагрузки в плантациях этого вида связано с увеличением высоты над уровнем моря. Наиболее оптимальные условия произрастания сосны брутильской (*P. brutia* TEN.) – на самом высокорасположенном участке относительно уровня моря. Лимитирующим фактором в данных условиях произрастания на малопродуктивных почвах будет являться влагообеспеченность участка.

Ключевые слова: сосна брутильская, *Pinus brutia* TEN., древостой, асимметрия, эксцесс, ряды распределения, средний диаметр, средняя высота, запас насаждения

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Таксационная структура насаждений сосны брутйской (*Pinus brutia* TEN.) в Сирии в зависимости от орографических условий / Н. В. Беляева, А. И. Новиков, Д. А. Данилов, Самер Алкинж // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 67–84. – Библиогр.: с. 80–83 (31 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/5>.

Поступила 10.02.2023. *Пересмотрена* 31.03.2023. *Принята* 19.04.2023. *Опубликована онлайн* 15.05.2023.

Article

Taxation structure of Brutia pine (*Pinus brutia* TEN.) in Syria depending on orographic conditions

Nataliia V. Beliaeva¹ ✉, galbel06@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-8673-2824>

Arthur I. Novikov³ arthur.novikov@vglta.vrn.ru  <https://orcid.org/0000-0003-1230-0433>

Dmitry A. Danilov^{1,2}, stown200@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7504-5743>

Samer Alkinj^{1,4}, sameralkinj@gmail.com  <https://orcid.org/0009-0007-8672-7719>

¹*Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint-Petersburg, 194021, Russia*

²*Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre, Institutskaya St., 1, Gatchinsky District, Leningrad Oblast, 188338, Russia*

³*Forestry Engineering Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva, 394087, Voronezh, Russia*

⁴*Tishreen University, Latakia, Syria*

Abstract

Artificial plantations of Brutia pine (*Pinus brutia* TEN.) in the conditions of two regions of Syria – the provinces of Latakia and Tartus – grow at different heights above sea level. At the research objects, accounting sites of a constant radius of 400 square meter were laid, arranged over an area in such a way as to cover the statistical variability of the studied taxation indicators. The distribution rows of tree trunks at a height of 1.3 m were ranked after 5 cm with the analysis of the indicators of symmetry and kurtosis of rank rows. The taxation indicators of the heights and diameters of the trunks of the trees of the Brutia pine (*P. brutia* TEN.) in its plantations have a direct correlation of varying strength with both the height of the site above sea level and the amount of precipitation. The indicator of the planting stock has the greatest direct correlation from the height of the plot above sea level and the amount of precipitation, in comparison with the indicator of the average diameter of the stands of the Brutia pine (*P. brutia* TEN.). The rank structure of the diameters of the trunks of the Brutia pine (*P. brutia* TEN.) has its own fundamental differences associated with the placement of growing areas above sea level. With an increase in the height above sea level of the plantation area, the number of trees with larger trunks in the plantation increases. An analysis of the asymmetry and excesses of the distribution series of diameters of trunks of the Brutia pine (*P. brutia* TEN.) revealed that a decrease in the competitive load in plantations of this species is associated with an increase in altitude above sea level. The most optimal conditions for the growth of the Brutia pine (*P. brutia* TEN.) are on the highest site relative to sea level. The limiting factor in these conditions of growth on infertile soils will be the moisture availability of the site.

Keywords: *Brutia pine, Pinus brutia* TEN., *forest stand, asymmetry, kurtosis, distribution series, average tree diameter, average tree height, growth stock*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Beliaeva N.V., Novikov A.I., Danilov D.A., Samer Alkinj (2023). Taxation structure of Brutia pine (*Pinus brutia* TEN.) in Syria depending on orographic conditions. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 67-84 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/4>.

Received 10.02.2023. **Revised** 31.03.2023. **Accepted** 19.04.2023. **Published online** 15.05.2023.

Введение

Насаждения сосны брутильской (*Pinus brutia* TEN.) считаются одной из важнейших лесных систем в восточном Средиземноморье в целом и в Сирии в частности, поскольку данная порода он является важным источником древесины, используемой во многих традиционных и современных отраслях промышленности [1-3].

Насаждения сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) также противостоят экстремальным условиям окружающей среды региона, что стимулировало их использование в целях профилактического облесения, защиты почвы от эрозии [5-7, 32]. В дополнении к экологической составляющей эти насаждения имеют и экономическую основу, так как формируют большое количество древесины, которое может удовлетворить потребности современной промышленности целлюлозы в Средиземноморском регионе [9, 10].

В Сирии, до 2015 года площадь естественных лесов достигала 232 840 га, а искусственных – 235 679 га, что в сумме составляло не более 2,7 % площади страны. Искусственные лесонасаждения достигли около 50 000 га, большая часть которых сосредоточена в Латакии¹⁶.

В Сирии в лесах насчитывается до 60 древесных пород, и из хвойных видов основными лесообразующими породами являются сосна алеппская (*Pinus halepensis* Mill.) и сосна брутильская (*P. brutia* Ten.). Сосновые леса *Pinus brutia* считаются одной из основных лесных природных систем в Сирии, поскольку они способствуют сохранению экологического баланса, сохранению и поддержа-

нию водных ресурсов, и являются естественным объектом, который очищает атмосферу от загрязнителей [4-6].

Насаждения сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) занимают около 145 000 га и сосредоточены в прибрежном регионе страны¹. Они встречаются во влажных, субгумидных и полузасушливых биоклиматических зонах [5]. Леса довольно разнообразны по возрасту, структуре и условиям произрастания. Исследования структуры насаждений сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) и ее произрастанию за последнее время посвящён ряд работ [11-19]. Данные насаждения являются средообразующим экологическим каркасом в данном регионе [12]. Однако вопрос структуры искусственных насаждений сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) в настоящее время не исследовался в полной мере. Поэтому исследование роста и продуктивности насаждений данного вида особенно важно в настоящий момент и в перспективе.

Цель исследования – изучение роста и продуктивности плантации сосны брутильской (*Pinus brutia* Ten.) в различных орографических условиях Сирийской Арабской Республики.

Для достижения цели необходимо выявить совместное влияние орографических (высота над уровнем моря) и климатических (осадки) факторов на рост (параметры диаметра и высоты дерева) и формирование таксационных характеристик (запаса насаждения) плантации сосны брутильской (*P. brutia* Ten.).

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Для Сирийской Арабской Республики сосна брутильская (*P. brutia* Ten.) является одним из основных лесообразователей. Растет на всех почвен-

¹⁶Forests of Syria. United Nation Development Programme (UNDP) / Report. INC-SY_V&A_Forest-Ar. GCEA. 41 p. Режим доступа: <https://rainforests.mongabay.com/deforestation/2000/Syria.htm> (дата обращения 10.12.2022)

Природопользование

ных субстратах и в большинстве биоклиматипов средиземноморского региона данной страны. Преобладающие материнские горные породы, подстилающие почвы в регионе исследования, являются либо известковыми породами, в том числе доломит, мел, мрамор, твердые или мягкие известняковые породы, или базальтовыми породами. Отсюда щелочной характер большей части сирийских почв.

Объектами исследования были участки искусственных насаждений сосны брутиевой, рас-

положенных в регионах Латакии и Тартуса на разной высоте над уровнем моря. Четыре участка в Латакии и три участка в Тартусе, которые были распределены вдоль южной части сирийского побережья, на высоте от 25 метров до высоты 1075 метров над уровнем моря (табл. 1). Сирийские прибрежные горы характеризуются постепенным уклоном на запад к морю, тогда как с востока они характеризуются очень крутым уклоном.

Таблица 1

Характеристика объектов исследования насаждений сосны брутиевой (*Pinus brutia* Ten.) на сирийском побережье Средиземного моря

Table 1

Characteristics of the study sites of the Brutia pine (*Pinus brutia* Ten.) plantations on the Syrian Mediterranean coast

№ п/п	Участок, регион, координаты Site-region, coordinates	Высота над уровнем моря, м Altitude above sea level, m	Биоклиматический регион Bioclimatic region	Годсоздания Year of planting	Годовое количество осадков, мм Annual rainfall, mm	Почвы Soils
1.	Фдио-Латакия 35° 52' 32" E 36° 29' 33" N	30	влажное и жаркое средиземноморье	1960-1961	750	Почва бедная, песчаная, неглубокая, плохо развитая
2.	Кфардебиль 36° 04' 27" E 35° 22' 06" N	250	влажное и жаркое средиземноморье	1974-1975	800	Почва мелкая белая известковая типа рандсина, происходящая на мраморизированных известняках
3.	Эль Бодхи-Латакия 36° 03' 44" E 35° 23' 54" N	330	влажное и жаркое средиземноморье	1975	1063	Почва белая, известковая, неглубокая, бедная и мало развитая, зарождающаяся на мраморизированных известняках
4.	Матн-Латакия 36° 06' 45" E 35° 26' 40" N	655	влажное и умеренное средиземноморье	1977-1978	1227	Почвы красновато-коричневого цвета, мощностью 10-30 см, на известняковых скалах.
5.	Астамна – Латакия 36° 07' 48" E 35° 27' 05" N	800	влажное и холодное средиземноморье	1979	1290	Почвы красновато-коричневого цвета, мощностью 20-40 см, на известняковых скалах
6.	Амрит-Тартус 35° 54' 30" E 34° 50' 34" N	25	влажное и жаркое средиземноморье	1970	729	Почва желтовато-коричневая, глубиной около 1 метра, средней текстуры с небольшим количеством гравия

Природопользование

№ п/п	Участок, регион, координаты Site-region, coordinates	Высота над уровнем моря, м Altitude above sea level, m	Биоклиматический регион Bioclimatic region	Годосоздания Year of planting	Годовое количество осадков, мм Annual rainfall, mm	Почвы Soils
7.	Айн Аффан – Тартус 36° 11' 14" E 34° 49' 27" N	390	влажное и жаркое средиземноморье	1976-1977	1144	Почва коричневая с глубокой глинистой структурой, глубиной более 1 метра
8.	гора Матта – Тартус 36° 15' 07" E 34° 57' 27" N	1075	средиземноморье очень влажное и холодное	1978	1346	Почва темно-коричневая, с глинистым гранулометрическим составом, глубокая и средняя глубина 50-100 см, доля камней в ней может достигать 25%

Источник: Министерство сельского хозяйства Сирии, 2022 г. Главное управление метеорологии Сирии, 2022 г. <http://moaar.gov.sy>

Source: Syrian Ministry of Agriculture, 2022 Syrian General Directorate of Meteorology, 2022. <http://moaar.gov.sy>

Южная часть сирийского побережья – это прибрежные равнины. Прибрежные равнины присутствуют с уровня поверхности моря и достигают высоты от 200-300 метров, имеют низкий градиент рельефа – в среднем 7-8 градусов. Размер прибрежных равнин варьируется, так в регионе Латакии они имеют ширину до 8 км в северном направлении, а далее прибрежный район расширяется, достигая ширины 23 км к югу от региона Тартус.

Сбор данных

Для исследования использовались оборудование и приборы, применяемые в лесоводственно-таксационных исследованиях: мерные вилки для измерения всех диаметров деревьев на опытных участках и цветные маркеры для отметки измеренных деревьев [20].

Измерение диаметров деревьев на высоте 1,3 м проводилось мерной таксационной вилкой фирмы Haglof с точностью до 0,01 см. Высотомер Нага использовался для измерения с точностью до 0,01 м высоты деревьев, представляющих ряды распределения по диаметрам.

На объектах исследования (см. табл. 1) заложено 32 учетных площадки постоянного радиуса 11,3 м площадью 400 м², с общим количеством деревьев 6567 штук, расположенные по площади та-

ким образом, чтобы охватить статистическую изменчивость изучаемых таксационных показателей, существующую в данных сообществах переменных по густоте деревьев, экспозиции, уклону и по разности плодородия участка [23-25]. Это связано с различием участков между собой по степени уклону от 5 до 40 % и неравномерностью размещения групп деревьев по склоновым формам рельефа на учетных площадках.

Таким образом, количество выборки от 4 до 9 связано с величиной статистической изменчивости диаметра и высот в пределах одного и того же участка. Чем больше статистическая изменчивость, тем большее количество круговых площадок постоянного радиуса закладывали на исследуемых участках, и наоборот.

Оценка запаса древесины на уровне одного дерева рассчитывали по уравнению

$$v_1 = h * g * f \quad (1)$$

где: v_1 – запас древесины на уровне одного дерева; h – высота, рассчитанная на уровне модельных деревьев, м; g – площадь поперечного сечения одного дерева м²; f – параметр формы ствола дерева, задаваемый следующим соотношением:

$$f = 0.42 + 0.12 * \exp(-0.39 * (dbh - 10)) * 0.1 \quad (2)$$

где dbh – диаметр, см на высоте 1,3 м.

Оценка запаса древесины, м³ на уровне выборки:

$$v_o = \sum_{i=1}^n (v_1 + v_2 + \dots + v_n) \quad (3)$$

Определение среднего запаса, м³ древесины на уровне выборки:

$$v_x = \frac{v_{o1} + v_{o2} + \dots + v_{on}}{n} \quad (4)$$

Нахождение запасов древесины на гектар, м³:

$$V = \frac{v_x * 10000}{s} \quad (5)$$

Анализ данных

Статистическую обработку полученных качественных порядковых и количественных данных проводили в программных пакетах Statistica StatSoft, версия 11, Microsoft Excel, версия 2010 года. Для выявления зависимостей таксационных показателей плантаций сосны брутиейской от высо-

ты над уровнем моря и количества осадков применяли корреляционный анализ данных, основанный на расчете коэффициента Пирсона вследствие нормального распределения параметров диаметра на высоте 1,3 м и высоты дерева. [24-26].

Результаты и обсуждение

После измерения диаметров и высот всех деревьев в количестве 6567 штук на опытных участках были получены средние значения диаметра и высот, чтобы выявить различия между этими участками в отношении успешности роста насаждений. Можно отметить наличие четких различий между средними диаметрами лесных участков в изучаемых насаждениях. Самый высокий средний диаметр составил 37,14 см на участке лесонасаждения сосны брутиейской (*P. brutia* Ten.) на горе Матта, а самый низкий средний диаметр составил 21,74 см – на участке Фидео (рис. 1).

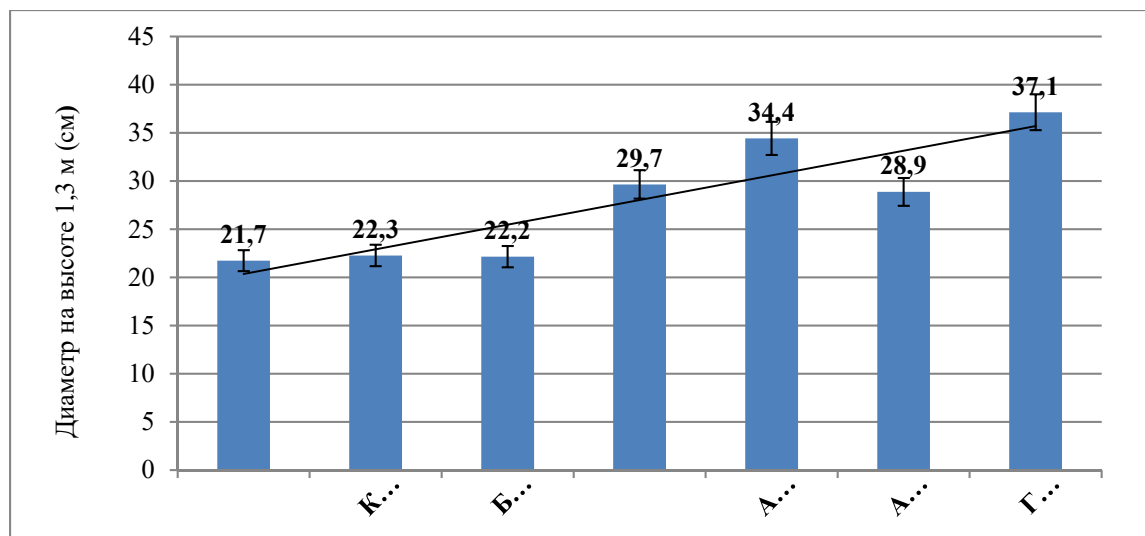


Рисунок 1. Средний диаметр (см) на высоте 1,3 м деревьев сосны брутиейской (*P. brutia* Ten.) на участках исследования

Figure 1. Average tree diameters (cm) in *Brutia* pine (*P. brutia* Ten.) stands at the study sites

Источник: собственная разработка авторов

Source: author's composition

Так же, как и для показателей средних диаметров, отмечается наличие четких различий параметров высоты деревьев между обследованными участками. Наибольшая средняя высота деревьев на

участке гора Матта составила 13,97 м. В то время, как самая низкая средняя высота деревьев на участке Фидео составила 11,71 м (рис. 2).

Корреляционный анализ по критерию Пирсона выявил сильную положительную связь показателей средних высот и диаметров с местом расположения участка над уровнем моря. Для средних диаметров насаждений коэффициент корреляции Пирсона составила $R_p = 0,88$, а для средних высот $R_p = 0,90$.

Искусственные насаждения сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) по показателю запаса на гектар имеют также явное различие в зависимости от расположения участка над уровнем моря. Обнаружена сильная положительная связь запаса насаждения с высотой участка над уровнем моря $R_p = 0,73$ и с количеством осадков за год $R_p = 0,62$ (рис. 3).

Для исследования ранговой структуры по диаметру ствола на высоте 1,3 м ряды распределения деревьев были организованы в девять рангов с шагом 5 см [27]. Первый ранг составляют деревья

диаметром до 10 см, а девятый последний ранг деревьев диаметром до 50 см.

Анализ данных сплошных перечетов на заложенных опытных объектах в насаждениях сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) показал, что участки четко различались ($p < 0,05$) по распределению между ними рангов деревьев, несмотря на близкий возраст по году создания насаждений.

Процент деревьев ниже диаметра 4 ранга (25 см) увеличивался на участках, расположенных на высоте 729-800 м над уровнем моря, по сравнению с более высоко расположенными участками.

Это свидетельствует о явных различиях в эволюции ранговой структуры групп деревьев в исследуемых насаждениях. Ранговое распределение по классам диаметров деревьев сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) в насаждениях, расположенных на разной высоте над уровнем моря, представлено на рис. 4-10.

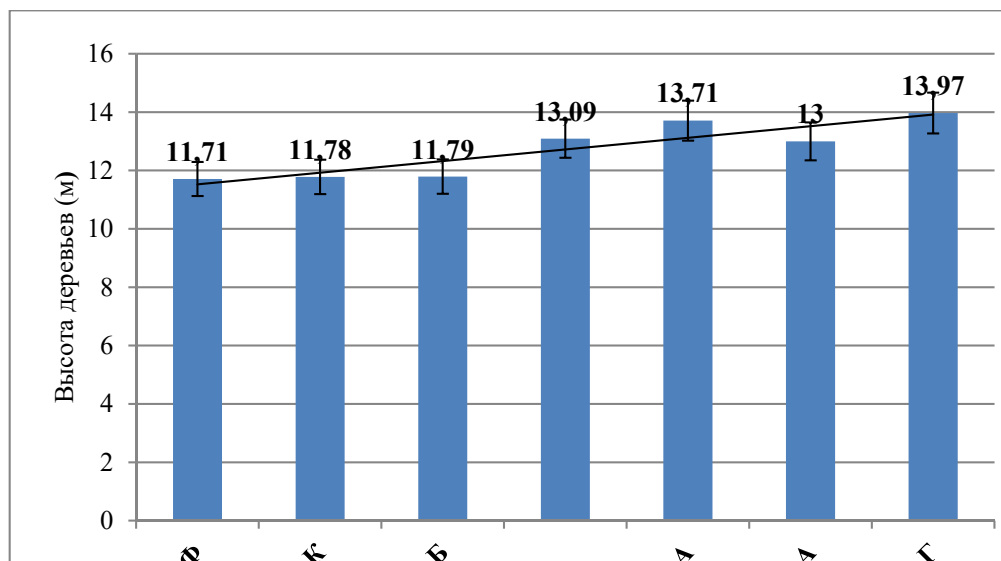


Рисунок 2. Средняя высота (м) деревьев сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) на участках исследования

Figure 2. Average tree heights (m) in Brutia pine stands at the study sites

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Природопользование

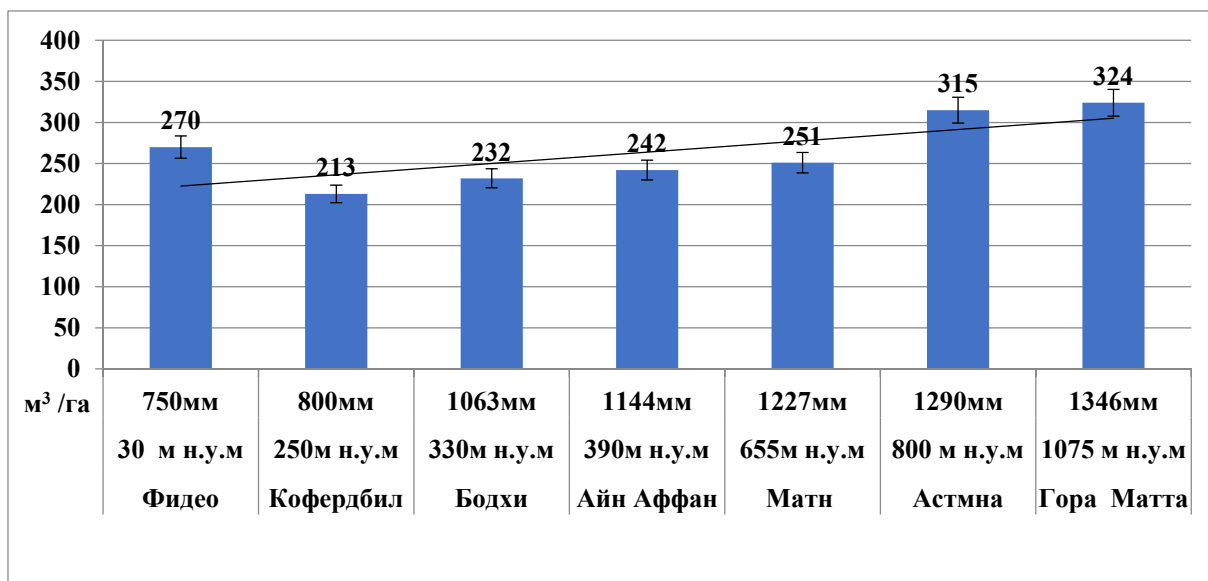


Рисунок 3. Запас древесины в насаждениях сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) на участках исследования в зависимости от расположения над уровнем моря и среднегодового количества осадков
 Figure 3. Wood stocks in Brutia pine plantations at the study sites depending on location above sea level and average rainfall

Источник: собственная композиция авторов
 Source: author's composition

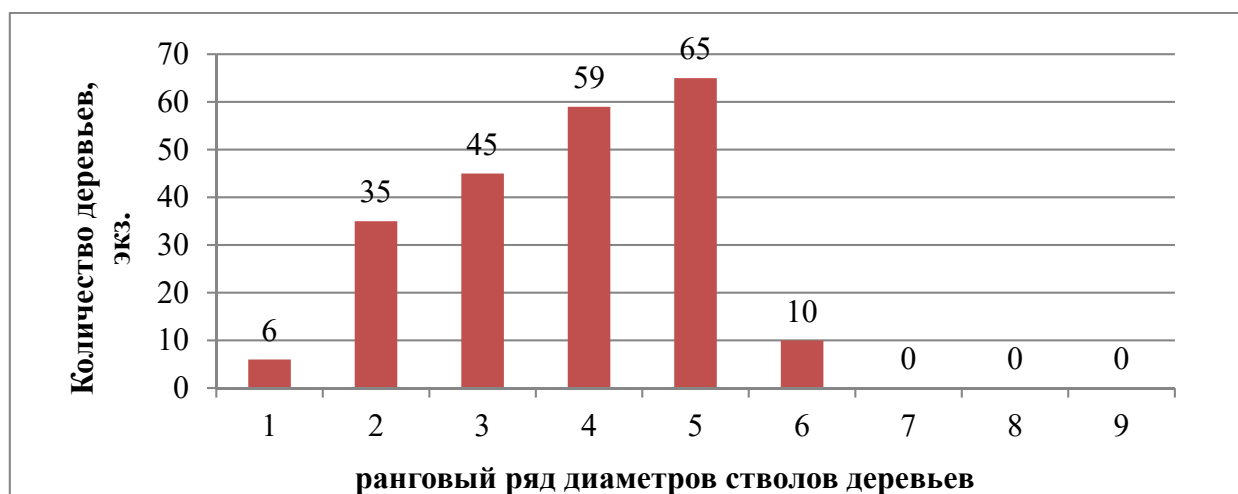


Рисунок 4. Распределение рангов деревьев сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) по классам диаметра стволов на уровне 1,3 м в насаждении на участке Фидео
 Figure 4. Distribution of stem diameter ranks of Brutia pine (*P. brutia* Ten.) in the Fideo locality

Источник: собственная композиция авторов
 Source: author's composition

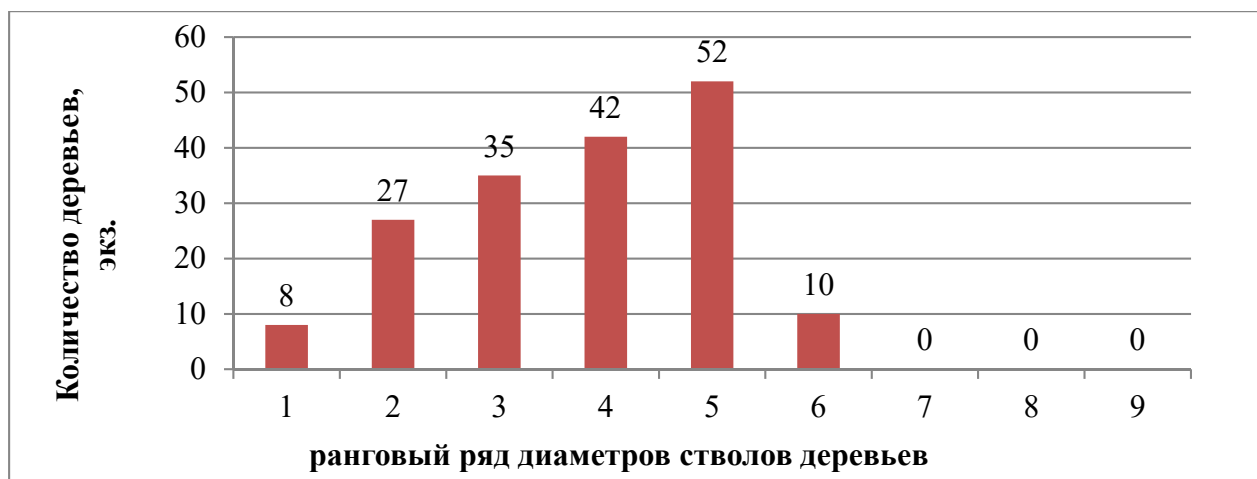


Рисунок 5. Распределение рангов деревьев сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) по классам диаметра ствола на уровне 1,3 м в насаждении на участке Кфардебиль

Figure 5. Distribution of stem diameter ranks of Brutia pine (*P. brutia* Ten.) in the Kfardebil locality

Источник: собственная разработка авторов

Source: author's composition



Рисунок 6. Распределение рангов деревьев сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) по классам диаметра ствола на уровне 1,3 м в насаждении на участке Хоран Аль-Буди

Figure 6. Distribution of stem diameter ranks of Brutia pine (*P. brutia* Ten.) in the Horan Al Boudi locality

Источник: собственная разработка авторов

Source: author's composition

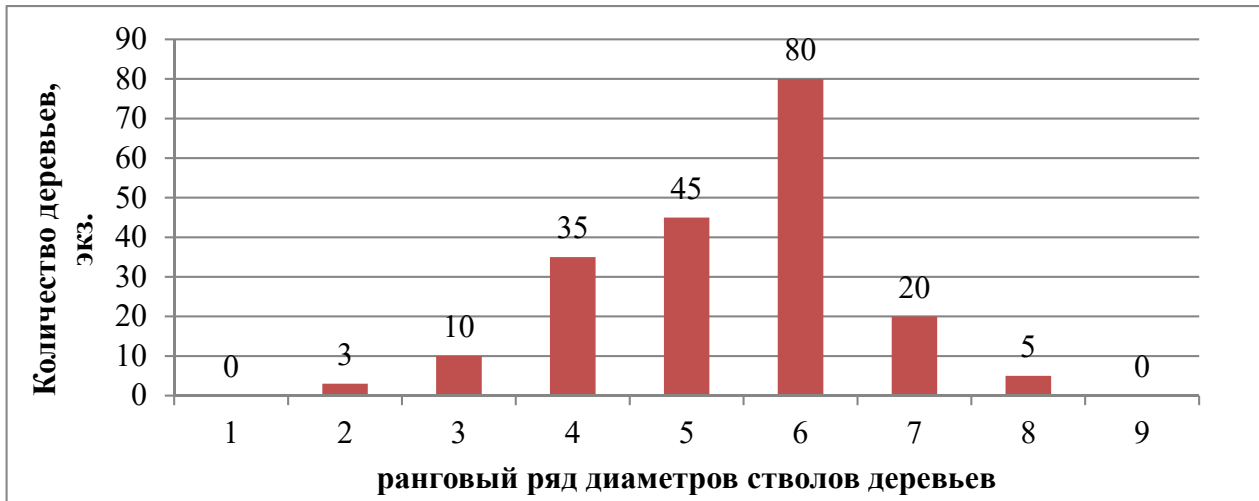


Рисунок 7. Распределение рангов деревьев сосны брутиевой (*P. brutia* Ten.) по классам диаметра ствола на уровне 1,3 м в насаждении на участке Метну

Figure 7. Distribution of stem diameter ranks of Brutia pine (*P. brutia* Ten.) in the Metnu locality

Источник: собственная разработка авторов

Source: author's composition

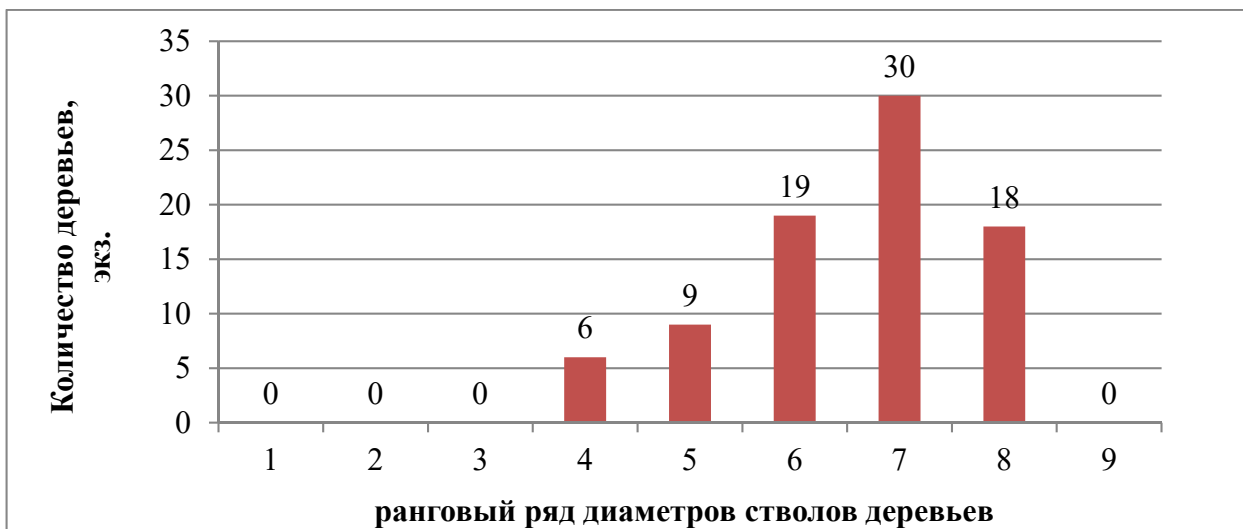


Рисунок 8. Распределение рангов деревьев сосны брутиевой (*P. brutia* Ten.) по классам диаметра ствола на уровне 1,3 м в насаждении на участке Астамне

Figure 8. Distribution of stem diameter ranks of Brutia pine (*P. brutia* Ten.) in the Astamne locality

Источник: собственная разработка авторов

Source: author's composition



Рисунок 9. Распределение рангов деревьев сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) по классам диаметра ствола на уровне 1,3 м в насаждении на участке Айн-Аффане

Figure 9. Distribution of stem diameter ranks of Brutia pine (*P. brutia* Ten.) in the Ain Affane locality

Источник: собственная разработка авторов

Source: author's composition



Рисунок 10. Распределение рангов деревьев сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) по классам диаметра ствола на уровне 1,3 м в насаждении на участке Матта

Figure 10. Distribution of stem diameter ranks of Brutia pine (*P. brutia* Ten.) in the Matta locality

Источник: собственная разработка авторов

Source: author's composition

Соотношение ранговых рядов деревьев сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) по классам диаметра ствола на уровне 1,3 м различно среди исследованных искусственных насаждений. Так, 66 % деревьев относятся к рангам ниже ряда диаметром 25 см в насаждениях сосны брутийской на участке Фидео. В то же время, для насаждений в Кфардабиль этот показатель будет составлять уже 64%, а для древостоев в Эль Бодхи – 65%.

С увеличением высоты участков над уровнем моря процентное соотношение деревьев, относящихся к более низким рангам по диаметру ствола на уровне 1,3 м, уменьшается на остальных более высоких участках, достигает 24,24 % в Аль-Матне, 22,96 % – в Айн-Аффане, 12,20 % – Астамне и 3,09 % – в древостое на Горе Матта.

При исследовании этих соотношений можно видеть четкие различия в развитии насаждений

сосны брутильской (*P. brutia* Ten.), поэтому отмечается, что в древостоях, расположенных высоко над уровнем моря, значительное количество деревьев переходит в верхние ранги классов по диаметру (свыше 25 см).

Для определения конкурентных внутривидовых взаимоотношений между деревьями сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) можно провести оценку по степени косости рядов распределения по диаметру ствола. По величине абсолютного значения коэффициента асимметрии можно констатировать, что, если он меньше 0,25, то косость незначительная, от 0,25 до 0,5 – умеренная, свыше 0,5 – сильная, и, следовательно, можно оценивать конкурентную нагрузку внутри насаждения [28-30].

Для оценки распределения эксцессивных признаков, т.е. накопления или снижения в ряду распределения значений диаметров стволов насаждения, определяется коэффициент эксцесса [31].

Для деревьев сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) в насаждениях, расположенных на высоте 30-250 метров над уровнем моря, характерно левостороннее с отрицательной асимметрией распределение диаметров деревьев, произошедшее вследствие накопления отставших в росте деревьев мелких ступеней толщины по диаметру (табл. 2). В данных насаждениях, вероятно, ощутимо возрастает влияние фактора конкуренции за почвенную влагу, заставляющее растения тянуться в высоту за счет снижения прироста по диаметру. При этом распределение признака становится асимметричным, а показатель диаметра имеет положительную косость.

Показатель асимметрии указывает на незначительную и умеренную скошенность ряда распределения, и данный вид распределения является характерным для распределений диаметров деревьев в разновозрастных насаждениях. Для насаждений, расположенных выше над уровнем моря, в более благоприятных местоположениях произрастания, просматривается преимущественное появление и средних, и крайних ступеней стволов диаметра, образу-

ются положительные эксцессивные распределения, имеющие вид острой пирамиды с расширенным основанием. Вариационные кривые, характеризующие изменчивость распределения по рангам диаметра ствола сосны брутильской (*P. brutia* Ten.), асимметричны, что может означать изреживание стволов меньших или более крупных рангов. Это изменяет количество деревьев в насаждении путем преимущественной элиминации худших в данных условиях деревьев, то есть путем естественного отпада. Если же фиксируемое состояние насаждений на данном этапе их роста стабильно и поддерживается стабилизирующим отбором, то изменчивость рангов диаметров ствола должна подчиняться закону нормального распределения, т.е. отклонения от среднего диаметра насаждения в сторону плюс- и минус-вариант должны встречаться одинаково часто [29-31].

Данное положение подтверждает насаждение сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) на участке Гора Матта с колоколообразным (нормальным) распределением диаметра деревьев и с преобладанием деревьев более крупных ступеней классов диаметров, чем в насаждениях, расположенных на более низких участках над уровнем моря, и асимметричности ряда распределения в этом случае не наблюдается. Ярко выраженный отрицательный эксцесс распределения классов диаметра деревьев сосны брутильской (*P. brutia* Ten.) в однородных по возрастному составу насаждениях свидетельствует о действии на древостой дизруптивного отбора деревьев в крайних рангах классов диаметра. Это, по-видимому, связано с неоднородностью условий местопроизрастания насаждений сосны брутильской (*P. brutia* Ten.). Деревья различных ранговых классов диаметра приспосабливаются к разным экологическим условиям в зависимости от расположения насаждения над уровнем моря.

В распределении эксцессивных признаков наблюдается чрезмерное накопление, и кривая распределения рангов деревьев в данном насаждении становится более плоской, о чем свидетельствует отрицательный показатель эксцесса.

Показатели асимметрии и скоса рядов распределения по классам диаметров деревьев сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) на объектах исследования

Indicators of asymmetry and bevel of the distribution series by diameter classes of the trees of the Brutia pine (*P. brutia* Ten.) on the objects of the study

Район исследования Study region	Латакия Latakia				Тартусса Tartus		
Показатели Parameters	Фидео Fideo	Кофердбил Coferdbil	Бодхи Bodkhi	Матн Matn	Астмна Astmna	Айн Аф-фан	Гора Матта
Асимметрия Asymmetry	-0,269	-0,086	0,449	1,191	0,497	1,263	0,000
Экссес Excess	-1,875	-1,568	-1,813	1,039	-0,326	1,015	-2,402

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Для других насаждений в распределении эксцессивных признаков ряда распределения по рангам диаметров стволов наблюдается снижение частот в центральных классах вариационного ряда с увеличением высоты насаждений над уровнем моря. Вследствие этого вершина кривой распределения рангов диаметра сильно поднимается и заостряется, показатель эксцесса принимает положительные значения. При сильном положительном эксцессе не исключено ужесточение стабилизирующего отбора, что происходит в насаждениях сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) в Матн-Латакия и в Айн Аффан-Тартусса, произрастающих на высотах 390 м и 655 м над уровнем моря.

Заключение

Сравнительный анализ таксационных характеристик средних высот и диаметров в насаждениях сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) показал явное изменение в сторону увеличения их показателей с расположением опытных объектов на более высоких участках над уровнем моря.

Стоит отметить, что более явно видно различие по увеличению среднего диаметра на уровне 1,3 м насаждений сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) с их расположением над уровнем моря, чем параметра высоты дерева. Различие в значениях запаса

среди изучаемых лесов может быть обусловлено рядом факторов, важнейшим из которых является количество осадков, выпадаемых в течение вегетационного сезона на изучаемых участках, а также различие в свойствах почв мест произрастания насаждений.

С увеличением высоты над уровнем моря процентное соотношение деревьев, относящихся к более низким рангам по диаметру ствола на уровне 1,3 м, уменьшается на остальных, более высоких, участках. Можно видеть четкие различия в развитии насаждений сосны брутийской (*P. brutia* Ten.), так как в древостоях, расположенных на высоте 600-1000 м над уровнем моря, значительное количество деревьев переходит в верхние ранги классов диаметров (более 25 см).

В целом надо отметить, что с возрастанием высоты над уровнем моря на участках с насаждениями сосны брутийской (*P. brutia* Ten.) происходит увеличение конкурентных внутривидовых взаимодействий между деревьями, если судить по возрастанию коэффициентов асимметрии. Оптимумом произрастания для искусственных насаждений сосны брутийской (*P. brutia* Ten.), по-видимому, является участок на Горе Матта, где ряд значений диаметров на уровне 1,3 м распределён по нормальному закону.

Список литературы

1. Алкинж С., Данилов Д. А. Сосна брутийская (*Pinus brutia* Ten.) как важный компонент лесов стран Восточного Средиземноморья и Черноморского бассейна (обзор). Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022;240:130-148. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.240.130-148>.
2. Алкинж С., Данилов Д. А. Исследование эффективности некоторых моделей, используемых для оценки высоты сосен в Сирии. Актуальные проблемы лесного комплекса. 2021;60:74-78. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47200125>.
3. Али М. С., Лежнин С. А., Воробьев О. Н., Курбанов Э. А. Мониторинг растительного покрова мухафаза Латакия Сирийской Арабской Республики по снимкам Landsat. Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2020; 3(47): 19–31. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2020.3.19>.
4. Воробьев О. Н., Али М. С. Классификация лесного покрова мухафаза Латакия Сирийской Арабской Республики по данным спутника Sentinel-2 // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018; 4: 110-122. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37423723>.
5. Olsson, S., Lorenzo, Z., Zabal-Aguirre, M. et al. Evolutionary history of the mediterranean *Pinus halepensis* –*brutia* species complex using gene-resequencing and transcriptomic approaches. Plant Mol Biol 106, 367–380 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11103-021-01155-7>.
6. Ali Kavgaci, Urban Šilc, Saima BaŞaran, Aleksander MarinŠek, Mehmet Ali BaŞaran, Petra KoŠir, Neslihan Balpınar, Мьневер Арслан, Цзге Денли, and Andraž Čarni. 2017. Classification of plant communities along postfire succession in *Pinus brutia* (Turkish red pine) stands in Antalya (Turkey). Turkish Journal of Botany 41:299-307. Available <http://journals.tubitak.gov.tr/botany/issues/bot-17-41-3/bot-41-3-8-1609-34.pdf> (accessed 2022.03.12).
7. Houminer N, Riov J, Moshelion M, Osem Y, David-Schwartz R. Comparison of Morphological and Physiological Traits between *Pinus brutia*, *Pinus halepensis*, and Their Vigorous F1 Hybrids. Forests. 2022; 13(9):1477. <https://doi.org/10.3390/f13091477>.
8. Houminer, N.; Houminer, N., Doron-Faigenboim, A., Shklar, G. et al. Transcriptome-based single-nucleotide polymorphism markers between *Pinus brutia* and *Pinus halepensis* and the analysis of their hybrids. Tree Genetics & Genomes 17, 14 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11295-021-01496-w>.
9. Keten İ., Gülsoy. SResearch on site index in the red pine (*Pinus brutia* Ten.) forests. Bilge International Journal of Science and Technology Research. 2020; 4, 2: 88-102. DOI: <https://doi.org/10.30516/bilgesci.740067>.
10. Catal Y., Carus S.A 2018 height-diameter model for Brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) plantations in Southwestern Turkey. Applied Ecology and Environmental Research. 16 (2): 1445-1459. DOI: https://doi.org/10.15666/aecer/1602_14451459
11. Abdo HG, Almohamad H, Al Dughairi AA, Al-Mutiry M. GIS-based frequency ratio and analytic hierarchy process for forest fire susceptibility mapping in the Western region of Syria. Sustainability. 2022; 14(8):4668. <https://doi.org/10.3390/su14084668>.
12. Sakici, O.E., Kucuk, O. & Ashraf, M.I. Compatible above-ground biomass equations and carbon stock estimation for small diameter Turkish pine (*Pinus brutia* Ten.). *Environ Monit Assess* **190**, 285 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6656-9>.
13. Ozbey Alper, Bilir Nebi. Block effect on genetic parameters in a 23-year-old progeny trial of *Pinus brutia*. Forestry engineering journal. 2022; 12 (2): 5-13. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/1>.
14. Catal Y., Carus S., 2018. A height-diameter model for brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) plantations in southwestern Turkey. Applied Ecology and Environmental Research 16(2): 1445–1459. https://doi.org/10.15666/aecer/1602_14451459.
15. Sakici, Oytun Emre et al. “Compatible above-ground biomass equations and carbon stock estimation for small diameter Turkish pine (*Pinus brutia* Ten.)” *Environmental Monitoring and Assessment* 190 (2018): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6656-9>.
16. Baysal, Ismail. “Vertical Crown Fuel Distributions in Natural Calabrian Pine (*Pinus brutia* Ten.) Stands.” *Croatian Journal of Forest Engineering* 42 (2021): 301-312. DOI: <https://doi.org/10.5552/CROJFE.2021.800>.

17. Yurtgan M, Baysal I, Küçük O (2022). Fuel characterization and crown fuel load prediction in non-treated Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) plantation areas. *iForest* 15: 458-464. - DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor4048-015>.
18. Bilgili E, Coskuner KA, Usta Y, Saglam B, Kucuk O, Berber T, Goltas M (2019). Diurnal surface fuel moisture prediction model for Calabrian pine stands in Turkey. *iForest* 12: 262-271. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor2870-012>.
19. Черных, Л. В. Аprobация методики лесоводственно-статистического обоснования способов и объёмов лесовосстановления на лесном участке / Л. В. Черных, Д. В. Черных, В. Л. Черных // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2021. – № 1(49). – С. 64-81. – DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.1.64>.
20. Alkinzh S., Danilov D. A. Assessment of the growing stock and annual increment of *Pinus brutia* Ten. stands in Kfardebel, Latakia, Syria // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021; 876: 012004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/876/1/012004>.
21. Hung, Bui Manh. “Tree-Size Variable Frequency Distribution Modeling for Tropical Forests in Ba Be, Vietnam.” *Biology Bulletin* 49 (2022): S135 - S147. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359022140072>.
22. Nautiyal R., Tiwari N., Chandra G., Kershaw J., Shaktan T. Alternate ranked set sampling for skewed and mound shaped symmetric distributions: accounting for forestry and environmental research. *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences*. 2021; 13:14-26. DOI: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85125084782&partnerID=MN8TOARS>
23. Chandra, Girish & Nautiyal, Raman & Chandra, Hukum & Roychoudhury, Nilanjan & Mohammad, Naseer. (2020). *Statistical Methods and Applications in Forestry and Environmental Sciences* Springer <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1476-0>.
24. Menéndez-Miguélez, María et al. “Improving tree biomass models through crown ratio patterns and incomplete data sources. *European Journal of Forest Research*. 140 (2021): 675 - 689. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01354-3>.
25. Leverett R.T., Ruskin D.N., Masino S.A. Direct Measurement of Trunk Volume in Forest Trees: Focus on White Pine and Comparison to a Statistical Method. *bioRxiv*. 2020.03.18.995985; DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.03.18.995985>.
26. Hong, S., Lynn, H.S. Accuracy of random-forest-based imputation of missing data in the presence of non-normality, non-linearity, and interaction. *BMC Med Res Methodol* 20, 199 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12874-020-01080-1>.
27. Петрин, Р. Д. Индексы скорости роста и коэффициенты типа роста по высоте лиственных лесных насаждений / Р. Д. Петрин // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 4(48). – С. 47-59. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/4>.
28. Таксационные показатели и товарная структура спелых смешанных древостоев сосны и ели в зеленомошных типах леса / Д. А. Данилов, Н. В. Беляева, Д. А. Зайцев, И. М. Анисимова // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 14-29. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/2>.
29. Smolański, G. (2020). Identifying the asymmetry of finite support probability distributions on the basis of the first two moments. *Measurement*, 149, 106968. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2019.106968>.
30. Связь абсолютно сухой фитомассы фракций деревьев *Alnus incana* (L.) Moench с таксационным диаметром в Северо-таежном районе Архангельской области / С. В. Третьяков, С. В. Коптев, И. В. Цветков [и др.] // Лесотехнический журнал. 2022; 12 (47): 62-78. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/6>.
31. Frontier technique of creating protective forests stands around nurseries on inefficient sites: technological foundations / A. Novikov, V. Ivetich, S. Nikulin [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12, No. 2(46). – P. 115-125. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/10>.

References

1. Alkinzh S., Danilov D. A. Sosna brutijskaja (*Pinus brutia* Ten.) kak vazhnyj komponent lesov stran Vostochnogo Sredizemnomor'ja i Chernomorskogo bassejna (obzor) [Brutus pine (*Pinus brutia* Ten.) as an important component of the forests of the Eastern Mediterranean and the Black Sea basin (review)] // *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotehniche-skoj akademii*. 2022. № 240. S. 130-148. DOI 10.21266/2079-4304.2022.240.130-148.

2. Alkinzh S., Danilov D. A. Issledovanie jeffektivnosti nekotoryh modelej, ispol'zuemyh dlja ocenki vysoty sosen v Sirii [Investigation of the effectiveness of some models used to estimate the height of pine trees in Syria] // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2021. № 60. S. 74-78.
3. Ali M. S., Lezhnin S. A., Vorob'jov O. N., Kurbanov Je. A. Monitoring rastitel'nogo pokrova muhafaza Latakija Sirijskoj Arabskoj Respubliki po snimkam Landsat [Vegetation monitoring of the Latakia Governorate of the Syrian Arab Republic based on Landsat images] // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo teh-nologicheskogo univepsiteta. Ser.: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie. 2020. No 3 (47). S. 19–31. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2020.3.19>
4. Vorob'ev O.N., Ali M.S. Klassifikacija lesnogo pokrova muhafaza Latakija Sirijskoj Arabskoj Respubliki po dannym sputnika Sentinel-2 [Classification of the forest cover of the Latakia Governorate of the Syrian Arab Republic according to the Sentinel-2 satellite] // Lesnye jekosistemy v uslovijah izmenenija klimata: biologicheskaja produktivnost' i distancionnyj monitoring: sbornik nauchnyh statej. Joshkar-Ola: PGTU, 2018. No 4. S. 110-122.
5. Olsson, S., Lorenzo, Z., Zabal-Aguirre, M. et al. Evolutionary history of the mediterranean *Pinus halepensis* –*brutia* species complex using gene-resequencing and transcriptomic approaches. *Plant Mol Biol* 106, 367–380 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11103-021-01155-7>.
6. Ali Kavgaci, Urban Šilc, Saime BaŞaran, Aleksander MarinŠek, Mehmet Ali BaŞaran, Petra KoŠir, Neslihan Balpinar, M'nevver Arslan, Czge Denli, and Andraž Čarni. 2017. Classification of plant communities along postfire succession in *Pinus brutia* (Turkish red pine) stands in Antalya (Turkey). *Turkish Journal of Botany* 41:299-307. Available <http://journals.tubitak.gov.tr/botany/issues/bot-17-41-3/bot-41-3-8-1609-34.pdf>, accessed 2017.09.04.
7. Houminer N, Riov J, Moshelion M, Osem Y, David-Schwartz R. Comparison of Morphological and Physiological Traits between *Pinus brutia*, *Pinus halepensis*, and Their Vigorous F1 Hybrids. *Forests*. 2022; 13(9):1477. <https://doi.org/10.3390/f13091477>.
8. Houminer, N.; Houminer, N., Doron-Faigenboim, A., Shklar, G. et al. Transcriptome-based single-nucleotide polymorphism markers between *Pinus brutia* and *Pinus halepensis* and the analysis of their hybrids. *Tree Genetics & Genomes* 17, 14 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11295-021-01496-w>.
9. Keten İ., Gülsoy. S Research on Site Index in the Red Pine (*Pinus brutia* Ten.) forests // Bilge International Jour-nal of Science and Technology Research 2020 4, Issue: 2, 88-102 DOI: 10.30516/bilgesci.740067
10. Catal Y., Carus S. A 2018 height-diameter model for brutian pine (*Pinus Brutia* Ten.) plantations in Southwest-ern Turkey *Applied Ecology and Environmental Research*, №16 (2), pp.1445-1459.
11. Abdo HG, Almohamad H, Al Dughairi AA, Al-Mutiry M. GIS-based frequency ratio and analytic hierarchy process for forest fire susceptibility mapping in the Western region of Syria. *Sustainability*. 2022; 14(8):4668. <https://doi.org/10.3390/su14084668>.
12. Sakici, O.E., Kucuk, O. & Ashraf, M.I. Compatible above-ground biomass equations and carbon stock estimation for small diameter Turkish pine (*Pinus brutia* Ten.). *Environ Monit Assess* 190, 285 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6656-9>.
13. Ozbey Alper, Bilir Nebi block effect on genetic parameters in a 23-year-old progeny trial of *Pinus brutia* // Le-sotehnicheskij zhurnal. 2022. №2 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/block-effect-on-genetic-parameters-in-a-23-year-old-progeny-trial-of-pinus-brutia> (data obrashhenija: 22.01.2023).
14. Çatal Y., Carus S., 2018. A height-diameter model for brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) plantations in southwestern Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research* 16(2): 1445–1459. https://doi.org/10.15666/aecr/1602_14451459.
15. Sakici, Oytun Emre et al. “Compatible above-ground biomass equations and carbon stock estimation for small diameter Turkish pine (*Pinus brutia* Ten.)” *Environmental Monitoring and Assessment* 190 (2018): 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6656-9>.

16. Baysal, Ismail. "Vertical Crown Fuel Distributions in Natural Calabrian Pine (*Pinus brutia* Ten.) Stands." *Croatian Journal of Forest Engineering* 42 (2021): 301-312. DOI: <https://doi.org/10.5552/CROJFE.2021.800>.
17. Yurtgan M, Baysal I, Küçük O (2022). Fuel characterization and crown fuel load prediction in non-treated Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) plantation areas. *iForest* 15: 458-464. - DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor4048-015>.
18. Bilgili E, Coskuner KA, Usta Y, Saglam B, Kucuk O, Berber T, Goltas M (2019). Diurnal surface fuel moisture prediction model for Calabrian pine stands in Turkey. *iForest* 12: 262-271. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor2870-012>.
19. Chernyh, L. V. Aprobaciya metodiki lesovodstvenno-statisticheskogo obosnovaniya sposobov i ob'yomov lesovosstanovleniya na lesnom uchastke / L. V. CHernyh, D. V. CHernyh, V. L. CHernyh // Vestnik Po-volzhskego gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie. – 2021. – № 1(49). – С. 64-81. – DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.1.64>.
20. Alkinzh S., Danilov D. A. Assessment of the growing stock and annual increment of *Pinus brutia* Ten. stands in Kfardebel, Latakia, Syria // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 6, Politics, Industry, Science, Education, St. Petersburg, 2021. P. 012004. DOI 10.1088/1755-1315/876/1/012004.
21. Hung, Bui Manh. "Tree-Size Variable Frequency Distribution Modeling for Tropical Forests in Ba Be, Vietnam." *Biology Bulletin* 49 (2022): S135 - S147. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062359022140072>.
22. Nautiyal, Raman & Tiwari, Neeraj & Chandra, Girish & Kershaw, John & Shaktan, Trishla. (2021). Alternate ranked set sampling for skewed and mound shaped symmetric distributions: accounting for forestry and environmental research. *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences*. №13. Pp.14-26.
23. Chandra, Girish & Nautiyal, Raman & Chandra, Hukum & Roychoudhury, Nilanjan & Mohammad, Naseer. (2015). *Statistics in Forestry: Methods and Applications*. Springer <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1476-0-8>.
24. Menéndez-Miguélez, María et al. "Improving tree biomass models through crown ratio patterns and incomplete data sources. *European Journal of Forest Research*. 140 (2021): 675 - 689. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01354-3>.
25. Leverett R.T., Ruskin D.N., Masino S.A. Direct Measurement of Trunk Volume in Forest Trees: Focus on White Pine and Comparison to a Statistical Method. *bioRxiv*. 2020.03.18.995985; DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.03.18.995985>.
26. Hong, S., Lynn, H.S. Accuracy of random-forest-based imputation of missing data in the presence of non-normality, non-linearity, and interaction. *BMC Med Res Methodol* 20, 199 (2020). <https://doi.org/10.1186/s12874-020-01080-1>.
27. Petrin, R. Growth-rate indices and growth type coefficients in height of broadleaves forest stands / R. Petrin // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Т. 12. – № 4. – С. 47-59. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/4>.
28. Danilov, D. Taxation indicators and commodity structure of ripe mixed pine and spruce stands in greenmoss forests / D. Danilov, N. Beliaeva, D. Zaytsev, I. Anisimova // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Т. 12. – № 2. – С. 14-29. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/2>.
29. Smołański, G. (2020). Identifying the asymmetry of finite support probability distributions on the basis of the first two moments. *Measurement*, 149, 106968. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2019.106968>.
30. Tretyakov, S. The equations of the relation of the weight of absolutely dry phytomass fractions of *Alnus incana* (L.) Moench trees with the taxation diameter in the taiga zone of the Arkhangelsk region / S. Tretyakov, S. Koptev, I. Tsvetkov et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 3. – P. 62-78. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/6>.
31. Frontier technique of creating protective forests stands around nurseries on inefficient sites: technological foundations / A. Novikov, V. Ivetich, S. Nikulin [et al.] // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12, No. 2(46). – P. 115-125. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/10>.

Сведения об авторах

✉ *Беляева Наталия Валерьевна* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8673-2824>, e-mail: galbel06@mail.ru.

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

Данилов Дмитрий Александрович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация; главный научный сотрудник отдела агрохимии и агроэкологии Ленинградского НИИСХ «Белогорка» - филиала Федерального исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха, ул. Институтская, 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, 188338, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7504-5743>, e-mail: stown200@mail.ru.

Самер Алкинж – аспирант кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, г. Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация; магистр Тишринского университета, Латакия, Сирия, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7500-5700>, e-mail: sameralkinj@gmail.com.

Information about the authors

✉ *Nataliia V. Beliaeva* – Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Professor of Forestry Department of Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov», Institutskiy per., 5, Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8673-2824>, e-mail: galbel06@mail.ru.

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

Dmitry A. Danilov – Dr. Sci. (Agriculture), Professor of Forestry Department of Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov», Institutskiy per., 5, Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation; Senior researcher, Department of agrochemistry and agroecology Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre, 1 Institutskaya Street, Belogorka, Leningrad Region, 188338, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7504-5743>, e-mail: stown200@mail.ru.

Samer Alkinj – post-graduate student of Forestry Department, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov», Institutskiy per., 5, Saint-Petersburg, 194021, Russian Federation; Master of Tishreen University, Latakia, Syria, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7500-5700>, e-mail: sameralkinj@gmail.com.

✉ – Для контактов/Corresponding author



Прогнозная модель послепожарного лесовосстановления в Иркутской области

Ольга И. Григорьева¹✉, grigoreva_o@list.ru, 0000-0001-5937-0813

Олег И. Гринько², goi2@yandex.ru, 0000-0003-1011-0329

Игорь В. Григорьев³, silver73@inbox.ru, 0000-0002-5574-1725

Евгений Г. Калита⁴, 007203@pnu.edu.ru, 0000-0001-6279-2742

Евгений А. Тихонов⁵, tihonov@petrsu.ru, 0000-0003-2136-3268

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Братский государственный университет» г. Братск, Российская Федерация

³ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», г. Якутск, Российская Федерация

⁴ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск, Российская Федерация

⁵ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, Российская Федерация

Лесные пожары являются одной из наиболее острых проблем лесного комплекса Российской Федерации. С одной стороны, большая часть естественных хвойных лесов бореальной зоны имеют пирогенное происхождение, а лесные пожары являются естественной составляющей сукцессий хвойных лесов. С другой стороны, лесные пожары наносят большой ущерб, заключающийся в затратах на их тушение, сгоревших материальных ценностей, включая поврежденный древостой на корню, а также экологический ущерб – загрязнение воздушного бассейна на больших площадях, загрязнение стока в водоемы, и т.д. Различные древесные породы, в различных лесорастительных условиях, по-разному реагируют на пирогенное воздействие различной интенсивности. Ярким примером являются лиственничные леса Республики Саха (Якутия), произрастающие на вечной мерзлоте, и очень хорошо приспособившиеся к достаточно частым природным пожарам. Принятие управленческих решений по видам и способам лесовосстановительных работ после лесных пожаров различной интенсивности должно опираться на прогнозные модели хода естественного лесовосстановления. Для составления такой модели для лесов Иркутской области были проведены натурные экспериментальные исследования, заключающиеся в обследовании гарей разных лет, после лесных пожаров различной интенсивности. В результате статистической обработки полученных экспериментальных данных были составлены математические зависимости развития многокомпонентной лесной экосистемы, включающей в себя хвойные и лиственные деревья младшей, средней и старшей возрастной группы, представленные в данной статье. Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета.

Ключевые слова: *послепожарная динамика, лесные пожары, естественное лесовосстановление, математическое моделирование*

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.


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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Прогнозная модель послепожарного лесовосстановления в Иркутской области / О. И. Григорьева, О. И. Гринько, И. В. Григорьев, Е. Г. Калита, Е. А. Тихонов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 85–98. – Библиогр.: с. 94–98 (24 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/6>.


Поступила 27.01.2023. *Пересмотрена* 08.04.2023. *Принята* 10.04.2023. *Опубликована онлайн* 15.05.2023.

Predictive model of post-fire reforestation in the Irkutsk region

Olga I. Grigoreva¹✉ grigoreva_o@list.ru,  0000-0001-5937-0813

Oleg I. Grinko² goi2@yandex.ru,  0000-0003-1011-0329

Igor V. Grigorev³ silver73@inbox.ru,  0000-0002-5574-1725

Evgeny G. Kalita⁴ 007203@pnu.edu.ru,  0000-0001-6279-2742

Evgeny A. Tikhonov⁵ tihonov@petrsu.ru,  0000-0003-2136-3268

¹FSBEI HE "St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov", St. Petersburg, Russian Federation

²FSBEI HE "Bratsk State University" Bratsk, Russian Federation

³FSBEI HE "Arctic State Agrotechnological University" Yakutsk, Russian Federation

⁴FSBEI HE "Pacific State University", Khabarovsk, Russian Federation

⁵FSBEI HE "Petrozavodsk State University", Petrozavodsk, Russian Federation

Abstract

Forest fires are one of the most acute problems of the forest complex of the Russian Federation. On the one hand, most of the natural coniferous forests of the boreal zone have pyrogenic origin, and forest fires are a natural component of the successions of coniferous forests. On the other hand, forest fires cause great damage, consisting in the costs of extinguishing them, burnt material values, including damaged stands on the root, as well as environmental damage - pollution of the air basin over large areas, pollution of runoff into reservoirs, etc. Different tree species, in different forest growing conditions, react differently to the pyrogenic effects of different intensities. A striking example is the larch forests of the Republic of Sakha (Yakutia), growing on permafrost, and very well adapted to fairly frequent wildfires. The adoption of management decisions on the types and methods of reforestation after forest fires of various intensity should be based on predictive models of the course of natural reforestation. To compile such a model for the forests of the Irkutsk region, full-scale experimental studies were carried out, consisting in the examination of hares of different years, after forest fires of varying intensity. As a result of statistical processing of the experimental data obtained, mathematical dependences of the development of a multicomponent forest ecosystem, including coniferous and deciduous trees of the younger, middle and older age groups, presented in this article, were compiled. The work was carried out within the framework of the scientific school "Innovative developments in the field of logging industry and forestry" of the Arctic State Agrotechnological University.

Keywords: *post-fire dynamics, forest fires, natural reforestation, mathematical modeling*

Funding: The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-26-00009, <https://rscf.ru/project/22-26-00009/>.

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: Predictive model of post-fire reforestation in the Irkutsk region / O. I. Grigoreva, O. I. Grinko, I. V. Grigorev, E. G. Kalita, E. A. Tikhonov. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 85-98 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/6>.

Received 27.01.2023. *Revised* 08.04.2023. *Accepted* 10.04.2023. *Published online:* 15.05.2023.

Введение

Федеральный закон от 19.07.2018 г. № 212-ФЗ «О внесении изменений в Лесной кодекс Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования воспроизводства лесов и лесоразведения», известный также как «Закон о компенсационном лесовосстановлении» предусматривает выделение в фонд лесовосстановления субъектов Российской Федерации земель лесного фонда, не находящихся в аренде. В том числе и гарей прошлых лет. При этом, согласно Правилам лесовосстановления, значительный упор делается на искусственное лесовосстановление, в том числе с использованием посадочного материала (сеянцев, саженцев) с закрытой корневой системой. Целесообразность такого способа лесовосстановления, в том числе по экономической эффективности, и по лесорастительной эффективности, до сих пор вызывает большие споры, особенно в ряде регионов Сибири и Дальнего Востока, и особенно для условий лесов криолитозоны. С учетом существенной специфики лесных экосистем на вечной мерзлоте следует выбирать оптимальные для данных условий не только варианты лесовосстановительных, но и лесосечных работ [1-4].

В разное время проблемами восстановления леса после пожаров занимались видные российские ученые Курбатский Н.П., Мелехов И.С., Буряк Л.В., Жила С.В. и др. Различным аспектам этой проблемы также посвящены публикации зарубежных коллег [5-10].

Для обоснованного выбора способа лесовосстановления после лесных пожаров различной ин-

тенсивности, в различных природно-производственных условиях, необходимо иметь прогнозную модель хода естественного лесовосстановления, основанную на натуральных наблюдениях [11-14].

Материалы и методы.

При подготовке материала статьи использовались данные натурального обследования гарей разных лет [15], после пожаров различной интенсивности, на территории Илимского лесничества Иркутской области, которое включает четыре участков лесничества: Воробьевское, Невонское, Седановское, Усть-Илимское. Характеристики обследуемых площадей приведены в таблице 1. В таблице 2 приведены результаты по количеству подростов хвойных и лиственных пород, которые были собраны на пробных площадках. В каждом выделе закладывалось по 30 учетных площадок. По условиям моделирования количество подростов (младшая возрастная группа) не переводилось на 1 га [16-19]. В результате статистической обработки полученных экспериментальных данных были составлены математические зависимости развития многокомпонентной лесной экосистемы, включающей в себя хвойные и лиственные деревья младшей, средней и старшей возрастной группы.

Полученные зависимости позволяют дать оценку перспективности лесовосстановительных сукцессий, необходимости использования искусственного или комбинированного лесовосстановления [20, 21], создания целевых лесных насаждений [22, 23].

Природопользование

Таблица 1

Характеристика насаждений до пожара

Table 1

Characteristics of plantations before the fire

№ п/п	Лесничество, № квартала/выдела	Площадь, га	Состав древостоя	Возраст, лет	Средние показатели		Бонитет/Полнота	Тип леса/ТУМ	Запас, м ³ /га	Вид пожара, год пожара
					Н, м	D, см				
1.	Илимское 116/26	9,5	Гарь	-	-	-	3/-	БРЗМ/В ₃	-	Верховой пожар, 2001 г.
2.	Илимское 240/21	20,1	Гарь, свежий сухой, 10С	100	18	20	3/-	РТ/С ₂	-	Низовой, устойчивый, средней интенсивности, 2002
3.	Илимское 74/24	9,2	гарь	-	-	-	4/-	БР/В ₂	-	Низовой пожар, сильный, 2006 г.
4.	Илимское 202/1	31,6	6Б4Ос	10	3	4	4/0,9	РТ/В ₃	10	Низовой пожар, сильный, 2006 г
5.	Илимское, 300/30,3 1	6,7	6С2Л 3Е2Б	160	19	20	4/0,7	БАГ/В ₃	260	Низовой, беглый, 2008
6..	Илимское, 45/49	23,9	3С1Л 4Ос2 Б	25	7	8	3/0,8	БРРТ/В ₂	90	Низовой, беглый, 2008 г.
7.	Илимское, 243/34	17,1	8С1Л 1Б	75	16,0	19,3	3/0,5	БР/В ₂	140	Низовой устойчивый 2011 г.
8.	Илимское, 120/20	56	7Л1С 2Б+Е +ОсГ арь, свежий сухой	150	23	27	3	РТЗМ/С ₃	80	Низовой устойчивый 2011 г.
9.	Илимское 26/6	28,5	9С1Б +Л	10	3,5	2	0,7/3	БРРТ/В ₃	20	Вырубка, пройденная пожаром, пожар 2011 г.

Природопользование

№ п/п	Лесничество, № квартала/выдела	Площадь, га	Состав древостоя	Возраст, лет	Средние показатели		Бонитет/Полнота	Тип леса/ТУМ	Запас, м ³ /га	Вид пожара, год пожара
					Н, м	D, см				
10.	Илимское, 255/4	17,1	7С1Л 1П1К	240	26	21	3/0,8	ОЛЬХ/ В ₃	350	Низовой устойчивый, сильный 2014 г.
11.	Илимское 125/9	5,6	гарь	-	-	-	3/-	БРРТ/ С ₂	-	Низовой, сильный, 2014 г.
12.	Илимское 327/14	6,5	7С3Б	85	18	20	0,8/3	РТ/В ₃	260	Низовой, 2016 г.

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 2

Количество младшей возрастной группы на обследуемых гарях

Table 2

Number of viable undergrowth on the surveyed fire sites

№	Пожар	Место, год	Кол-во деревьев младшей возрастной группы 3-20 лет, шт.	
			Лиственные (береза, осина)	Хвойные (сосна, лиственница)
1	Верховой	Кеульская дача, квартал 116, выдел 26, 2001	82	76
2	Верховой	Воробьевская дача, квартал 240, выдел 21, 2002	341	919
3	Верховой	Невонская дача, квартал 202, выдел 1, 2006	256	87
4	Верховой	Воробьевское участковое лесничество, квартал 300, выдел 31, 2008	222	626
5	Низовой устойчивый	Невонская дача, квартал 120, выдел 20, 2011	714	136
6	Низовой устойчивый	Невонская дача, квартал 125, выдел 9, 2014	0	157
7	Низовой беглый	Невонское участковое лесничество, квартал 327, выдел 14, 2016	89	200
8	Низовой беглый	Невонская дача, квартал 26, выдел 6, 2011	122	111
9	Низовой сильный	Кеульская дача квартал 74, выдел 24, 2006	4	590
10	Низовой сильный	Воробьевское участковое лесничество, квартал 45, выдел 49, 2008	182	217
11	Низовой сильный	Невонская дача, квартал 243, выдел 34, 2011	66	971
12	Низовой сильный	Невонская дача, квартал 255, выдел 4, 2014	869	128

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Результаты и обсуждение

Рассмотрим развитие многокомпонентной экосистемы, включающей в себя хвойные и лиственные деревья младшей (0-20 лет хвойные, 0-10 лет лиственные), средней (21-60 – хвойные. 11-40 лиственные) и старшей (старше 60 лет хвойные, старше 40 лет – лиственные) возрастной группы. В качестве основы математической модели примем положения [24], описывающие развитие древесных ценозов:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \rho z - \gamma(y, z)x - fx, \\ \frac{dy}{dt} = fx - qy - py, \\ \frac{dz}{dt} = qy - hz, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – коэффициент размножения, f – коэффициент перехода деревьев младшей возрастной группы в среднюю, γ – функция прироста деревьев младшей возрастной группы, q – коэффициент перехода деревьев средней возрастной группы в старшую, p – коэффициент прироста средней возрастной группы, h – коэффициент смертности старшей возрастной группы, x, y, z – количество деревьев соответственно младшей, средней и старшей возрастной группы на площади, занятой древесным ценозом.

Разовьем предложенную математическую модель, и учтем, что деревья средней и старшей возрастной групп начнут появляться лишь спустя определенное время. Кроме того, помимо коэффициентов, будем рассматривать функции смертности деревьев при распаде возрастного древостоя:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \rho z - fx \text{He}(t - T_{xy}) - \{\gamma(y, z) + \xi_u \text{He}(t - T_\xi)\}x, \\ \frac{dy}{dt} = fx \text{He}(t - T_{xy}) - qy \text{He}(t - T_{yz}) - \{p + \xi_v \text{He}(t - T_\xi)\}y, \\ \frac{dz}{dt} = qy \text{He}(t - T_{yz}) - \{h + \xi_w \text{He}(t - T_\xi)\}z, \end{cases} \quad (2)$$

где T_{xy} – время, соответствующее переходу деревьев в среднюю возрастную группу, T_{yz} – время, соответствующее переходу деревьев в старшую возрастную группу, T_ξ – время начала распада древостоя, ξ – коэффициенты смертности деревьев соответствующих возрастным групп при распаде древостоя, $\text{He}(\zeta)$ – единичная функция:

$$\begin{cases} \text{He}(\zeta) = 1, \zeta \geq 0 \\ \text{He}(\zeta) = 0, \zeta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

где ζ – аргумент функции (3).

Значения коэффициентов зависят от принятых предпосылок к исследованию, вкладывае-

мого биологического смысла, и до настоящего времени не установлен. Для определения их порядка используем следующую предпосылку, основанную на биологической модели древостоя: к определенному возрасту распределение деревьев в древостое стремится к нормальному; это состояние будем считать устойчивым. Приблизительно примем, что в устойчивом состоянии количество деревьев в трех возрастных группах равно и рассмотрим более простую модель:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \rho z - fx, \\ \frac{dy}{dt} = fx - qy, \\ \frac{dz}{dt} = qy - hz, \end{cases} \quad (4)$$

при начальных условиях:

$$x(0) = x_0, y(0) = 0, z(0) = 0, \quad (5)$$

причем для устойчивого состояния запишем:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \rho z - fx = 0, \\ \frac{dy}{dt} = fx - qy = 0, \\ \frac{dz}{dt} = qy - hz = 0 \\ x(T) = y(T) = z(T), \end{cases} \quad (6)$$

где T – время, необходимое для формирования зрелого древостоя.

Тогда

$$h = f = q = \rho, \quad (7)$$

в этом случае решение системы (2) имеет вид:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{x_0}{3} + \frac{2x_0 e^{-\frac{3\rho t}{2}} \cos\frac{\rho t \sqrt{3}}{2}}{3} \\ y(t) = \frac{x_0 \left(1 + e^{-\frac{3\rho t}{2}} \sqrt{3} \sin\frac{\rho t \sqrt{3}}{2} - e^{-\frac{3\rho t}{2}} \sqrt{3} \cos\frac{\rho t \sqrt{3}}{2}\right)}{3} \\ z(t) = \frac{x_0 \left(1 - e^{-\frac{3\rho t}{2}} \sqrt{3} \sin\frac{\rho t \sqrt{3}}{2} - e^{-\frac{3\rho t}{2}} \sqrt{3} \cos\frac{\rho t \sqrt{3}}{2}\right)}{3} \end{cases} \quad (8)$$

учтем, что $x(T) = y(T) = z(T)$, тогда «масштабирующий» коэффициент ρ :

$$\rho \approx \frac{1,21}{T}. \quad (9)$$

Величину T будем считать известной приближенно. Исследование численного решения модели (2) при различных отношениях $\rho, h, \gamma(y, z) = \gamma y, q, p$ показало, что характер развития древостоя зависит от того, как упорядочены коэффициенты по величине. Например, при $f > h > q > \rho \approx \frac{1,21}{T} \gg \gamma \geq p$ наблюдается стабильный рост древостоя (вплоть до

Природопользование

начала распада). Конкретные их значения будут зависеть во многом от природных условий.

В табл. 3 приведены оценки коэффициентов системы (2), полученные эмпирическим путем, ис-

пользованные в нашем исследовании. На рис. 1-4 проиллюстрирована динамика послепожарной сукцессии некоторых лесных участков (по табл. 3).

Таблица 3

Числовые значения коэффициентов математической модели

Table 3

Numerical values of the mathematical model coefficients

Участок	Хвойные					Лиственные				
	h/ρ	f/ρ	γ	q/ρ	p	h/ρ	f/ρ	γ	q/ρ	p
1	1,05	1,1	-0,035	1,01	-0,01	1,01	0,99	0,01	0,99	0,02
2	1,01	1,01	0,0007	1,01	-0,001	1,01	0,99	0,02	0,99	0,02
3	1,05	1,1	-0,03	1,01	-0,01	0,99	1,01	-0,002	0,99	-0,002
4	1,01	1,01	0,004	1,01	-0,001	0,99	1,01	-0,002	0,99	-0,002
5	1,05	1,1	-0,02	1,01	-0,01	0,99	1,01	0,002	0,99	0,002
6	1,05	1,1	-0,025	1,01	-0,01	-	-	-	-	-
7	1,05	1,1	-0,015	1,01	-0,01	0,99	1,01	-0,003	0,99	-0,003
8	1,05	1,1	-0,025	1,01	-0,01	0,99	1,01	-0,002	0,99	-0,002
9	1,01	1,01	0,003	1,01	-0,001	0,99	1,01	-0,03	0,99	-0,03
10	1,05	1,1	-0,0125	1,01	-0,01	0,99	1,01	-0,001	0,99	-0,001
11	1,01	1,01	0,0085	1,01	-0,001	0,99	1,01	-0,002	0,99	-0,002
12	1,05	1,1	-0,025	1,01	-0,01	0,99	1,01	0,003	0,99	0,003
	$T = 40$ лет, $T_{xy} = 30$ лет, $T_{yz} = 50$ лет, $\zeta = 0,01$, $T_{\zeta} = 120$ лет					$T = 20$ лет, $T_{xy} = 20$ лет, $T_{yz} = 30$ лет, $\zeta = 0,035$, $T_{\zeta} = 80$ лет				

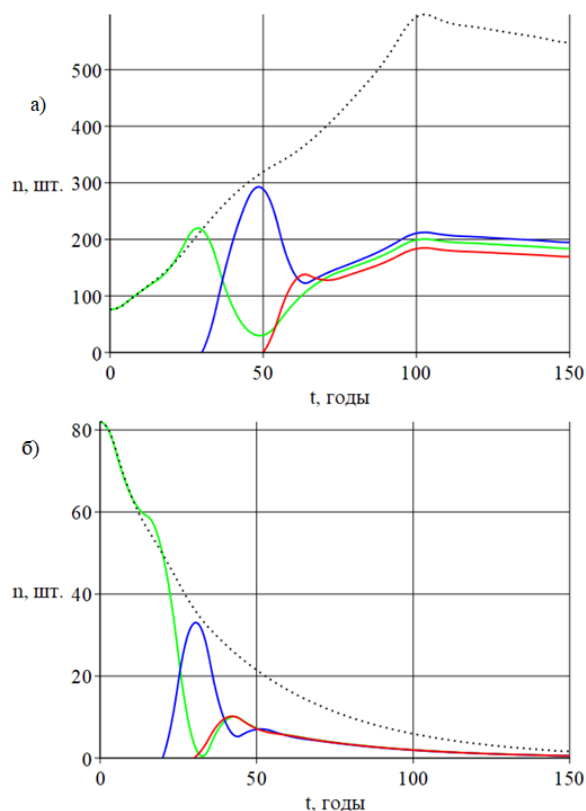


Рисунок 1. Динамика послепожарной сукцессии, построенная по математической модели на участке №1. Кеульская дача, квартал 116, выдел 26, 2001 г. (Верховой пожар):

а) Хвойные деревья; б) Лиственные деревья
 зеленая линия – младшая возрастная группа;
 синяя линия – средняя возрастная группа; красная
 линия – старшая возрастная группа; пунктирная
 линия – оценка общего числа деревьев

Fig. 1. The dynamics of the post-fire succession, built according to a mathematical model on site No. 1. Keulskaya dacha, block 116, allocated 26, 2001. (Top fire):

а) Coniferous trees; б) Deciduous trees.
 green line - juvenile; blue line - middle age
 group; red line - older age group; dashed line - estimate
 of total number of trees

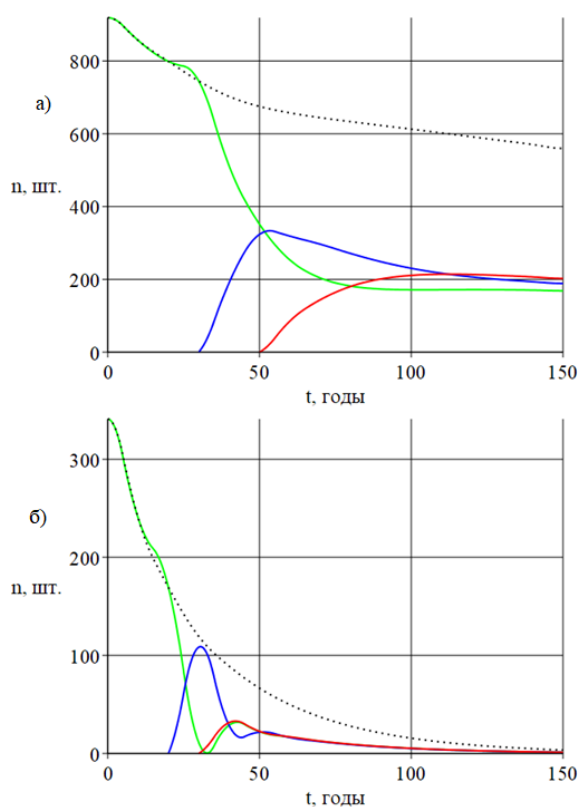


Рисунок 2. Динамика послепожарной сукцессии, построенная по математической модели на участке № 2. Воробьевская дача, квартал 240, выдел 21, 2002 г. (Низовой пожар, устойчивый, средней интенсивности):

а) Хвойные деревья; б) Лиственные деревья
 зеленая линия – младшая возрастная группа;
 синяя линия – средняя возрастная группа; красная
 линия – старшая возрастная группа; пунктирная
 линия – оценка общего числа деревьев

Fig. 2. The dynamics of the post-fire succession, built according to a mathematical model on site No. 2. Vorobyovskaya dacha, block 240, allocated 21, 2002. (Grassroots fire, steady, medium intensity):

а) Coniferous trees; б) Deciduous trees.
 green line - juvenile; blue line - middle age
 group; red line - older age group; dashed line - estimate
 of total number of trees

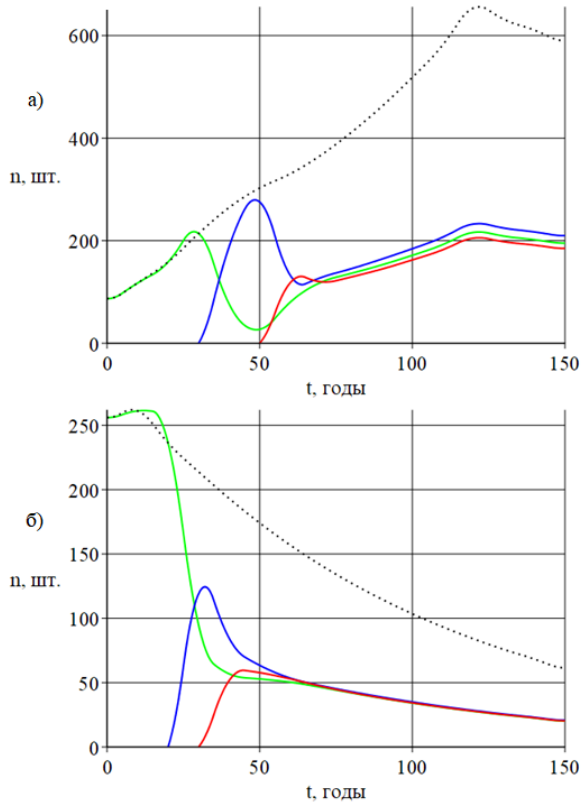


Рисунок 3. Динамика послепожарной сукцессии, построенная по математической модели на участке № 3. Невонская дача, квартал 202, выдел 1, 2006 г. (Низовой пожар, сильный):

а) Хвойные деревья; б) Лиственные деревья
 зеленая линия – младшая возрастная группа;
 синяя линия – средняя возрастная группа; красная
 линия – старшая возрастная группа; пунктирная
 линия – оценка общего числа деревьев

Fig. 3. The dynamics of the post-fire succession, built according to a mathematical model on site No. 3. Novinskaya dacha, block 202, allocated 1, 2006.

(Grassroots fire, strong):

а) Coniferous trees; б) Deciduous trees.
 green line - juvenile; blue line - middle age
 group; red line - older age group; dashed line - estimate
 of total number of trees

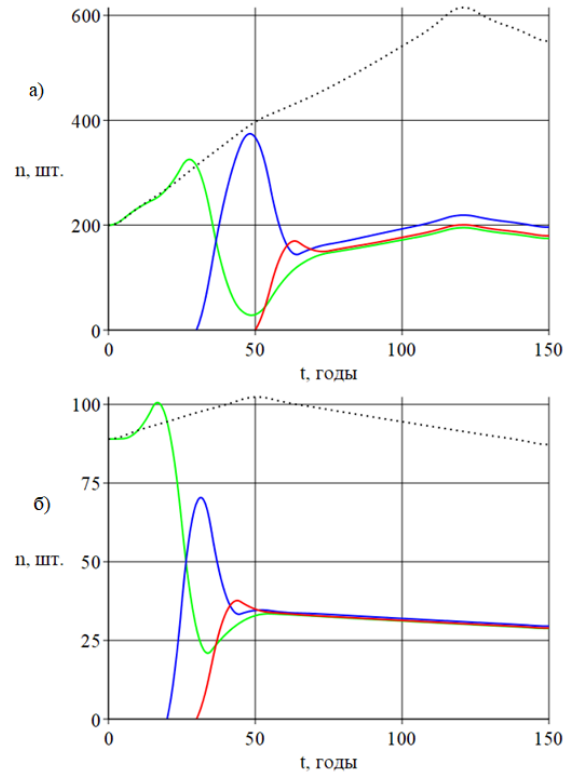


Рисунок 4. Динамика послепожарной сукцессии, построенная по математической модели на участке № 7. Невонское участковое лесничество, квартал 327, выдел 14, 2016 г. (Низовой беглый пожар)

а) Хвойные деревья; б) Лиственные деревья
 зеленая линия – младшая возрастная группа;
 синяя линия – средняя возрастная группа; красная
 линия – старшая возрастная группа; пунктирная
 линия – оценка общего числа деревьев

Fig. 4. The dynamics of post-fire succession, built according to a mathematical model on site No. 7. Nevonskoe district forestry, block 327, allocated 14, 2016. (Lower Runaway Fire)

а) Coniferous trees; б) Deciduous trees.
 green line - juvenile; blue line - middle age
 group; red line - older age group; dashed line - estimate
 of total number of trees

Выводы

Анализ данных табл. 3 и графиков (рис. 1-4) показывает ситуацию, которая складывается после пожаров различной степени интенсивности. После верховых пожаров активно проходит лесовосстановление не только хвойных, но и лиственных по-

род. После верховых пожаров и сильных низовых пожаров увеличивается количество хвойных деревьев и резко уменьшается число лиственных деревьев. Такая тенденция может быть связана с тем, что лиственные породы постепенно создавая лесную среду, создают благоприятные условия для роста хвойных пород.

На площадях, пройденных беглыми пожарами количество лиственных пород также уменьшается, но не так активно.

Процесс лесовосстановления на обследованных гарях можно считать удовлетворительным. После сильных низовых и верховых пожаров идет интенсивное прогорание подстилки, а этот процесс способствует появлению и развитию молодого поколения древостоя.

Список литературы

1. Рудов С.Е. Теоретические исследования экологической совместимости колесных лесных машин и мерзлотных почвогрунтов лесов криолитозоны / С.Е. Рудов, О.А. Куницкая // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Международной научно-технической конференции. Отв. редактор Н.С. Захаров. - 2020. - С. 323-326.
2. Никитина Е.И. Проект организации лесозаготовок в условиях Алданского лесничества с применением многооперационных лесозаготовительных комплексов / Е.И. Никитина, О.А. Куницкая, Ф.В. Николаева // современные проблемы и достижения аграрной науки в Арктике. Сборник научных статей по материалам Всероссийской студенческой научно-практической конференции с международным участием в рамках «Северного форума – 2020» (29–30 сентября 2020 г., Якутск) и Международной научной онлайн летней школы – 2020 (6–20 июля 2020 г., Якутск). - 2020. - С. 138-148.
3. Куницкая О.А. Экологические аспекты выборочных рубок леса /О.А. Куницкая, Е.И. Никитина // Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития Республики Беларусь и Российской Федерации. сборник статей III Международной научно-технической конференции "Минские научные чтения-2020": в 3 томах. Белорусский государственный технологический университет, Представительство федерального агентства по делам СНГ, соотечественников, проживающих за рубежом, и по международному гуманитарному сотрудничеству (Россотрудничество) в Республике Беларусь. Минск, - 2021. - С. 286-291.
4. Куницкая О.А. Особенности лесозаготовки в Республике Саха Якутия /О.А. Куницкая, Е.И. Никитина, Ф.В. Николаева // Управление земельными ресурсами, землеустройство, кадастр, геодезия и картография. Проблемы и перспективы развития. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 255-летию Землеустройству Якутии и Году науки и технологий. Якутск, - 2021. - С. 308-313.
5. González de Andrés, E. Interactions between climate and nutrient cycles on forest response to global change: the role of mixed forests // *Forests*. – 2019. – Т. 10. – № 8. – P. 609. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10080609>.
6. Gong, Y. Characterizing Growing Season Length of Subtropical Coniferous Forests with a Phenological Model / Y. Gong, C.L. Staudhammer, S. Wiesner et al. // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – № 1. – P. 95. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12010095>.
7. Downing W.M. How do plant communities differ between fire refugia and fire-generated early-seral vegetation? / W.M. Downing, M.A. Krawchuk, G.W. Meigs, C. Tortorelli, J.D. Coop, R.B. Walker, S.L. Haire, E. Whitman, G. Chong, C. Miller // *Journal of Vegetation Science*. 2020. Т. 31. № 1. С. 26-39.
8. Grau-Andrés, R. Responses of bryosphere fauna to drought across a boreal forest chronosequence / R. Grau-Andrés, S. Thieffry, S. Tian et al. // *Oecologia*. – 2022. – Vol. 200. – № 1-2. – P. 231-245. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-022-05255-z>.
9. Stephenson, S.L. Assemblages of myxomycetes associated with three different substrates affected by forest wildfires / S.L. Stephenson, N. Payal, G. Kaur, C. Rojas // *Plant Ecology and Evolution*. – 2021. – Vol. 154. – № 1. – P. 15-27. DOI: <https://doi.org/10.5091/plecevo.2021.1762>.

10. Ponce-Calderón, L. Historical fire ecology and its effect on vegetation dynamics of the Lagunas de Montebello National Park, Chiapas, México / L. Ponce-Calderón, D. Rodríguez-Trejo, J. Villanueva-Díaz et al. // *iForest - Biogeosciences and Forestry*. – 2021. – Vol. 14. – № 6. – P. 548-559. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer3682-014>.
11. João, T. Indicator-based assessment of post-fire recovery dynamics using satellite NDVI time-series / T. João, G. João, M. Bruno, H. João // *Ecological Indicators*. – 2018. – Vol. 89. – P. 199-212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.008>.
12. Жила С.В. Лесовозобновление после пожаров разной интенсивности в сосняках средней Сибири / С.В. Жила, Г.А. Иванова, В.А. Иванов, П.А. Цветков // *Сибирский лесной журнал*. - 2019. - № 6. - С. 53-62.
13. Глушко С.Г. Формирование молодняков после рубок и пожаров в темнохвойных осокново-папоротниковых лесах южного Сихотэ-Алиня / С.Г. Глушко, Т.А. Комарова, Н.Б. Прохоренко // *Лесоведение*. 2022. № 2. С. 144-156.
14. Бибаева А.Ю., Макаров А.А., Ноговицын В.Н. Послепожарное восстановление растительного покрова северной части Приморского хребта / А.Ю. Бибаева., А.А. Макаров., В.Н. Ноговицын // *Географический вестник*. 2022. № 3 (62). С. 6-18. 2. С. 144-156.
15. Габышева Л.П. . Лесовосстановление на гарях Юго-Западной Якутии (на примере Олекминского района) / Л.П. Габышева // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2018. Т. 20. № 5-3 (85). С. 335-340.
16. Кирбижекова И.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Балтухаев А.К., Дагуров П.Н. Исследование восстановления соснового леса после пожара на основе поляриметрических и оптических данных на тестовом участке Байкальского региона / И.И. Кирбижекова., Т.Н. Чимитдоржиев., А.В. Дмитриев., А.К. Балтухаев., П.Н. Дагуров // В книге: Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2021. С. 352. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/mnlfkv>.
17. Литвинцева З.О. Современные преобразования геосистем западного макросклона Баргузинского хребта / З.О. Литвинцева // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*. - 2021. - Т. 38. - С. 88-99.
18. Соболев С.А., Денисов А.Н., Колчин Е.А. Влияние пирогенного фактора на природные экосистемы / С.А. Соболев., А.Н. Денисов., Е.А. Колчин. // В сборнике: Современные исследования в науках о Земле: ретроспектива, актуальные тренды и перспективы внедрения. Материалы Международной научно-практической конференции. Составители Н.С. Шуваев, Е.А. Колчин, Д.А. Пензерь. 2019. С. 63-69. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2021. С. 352.
19. Гынинова А.Б., Убугунов Л.Л., Куликов А.И., Гынинова Б.Д., Гончиков Б.М.Н., Бадмаев Н.Б., Сымпилова Д.П. Послепожарная эволюция лесных экосистем на песчаных террасах Юго-Восточного Прибайкалья / А.Б. Гынинова., Л.Л. Убугунов., А.И. Куликов., Б.Д. Гынинова., Б.М.Н. Гончиков., Н.Б., Бадмаев Д.П. Сымпилова // *Сибирский экологический журнал*. 2020. Т. 27. № 1. С. 13-25.
20. Морковина С.С. Оценка экономических угроз лесных пожаров экспертным методом / С.С. Морковина, В.В. Манмарева // *Стратегии противодействия угрозам экономической безопасности России. Материалы II Всероссийского форума по экономической безопасности*. Выпуск II. - 2019. - С. 245-249.
21. Куницкая О.А. Перспективные направления развития транспортно-технологических систем лесного комплекса России / О.А. Куницкая, Д.И. Степанова, М.Ф. Григорьев // *Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе*. Материалы международной научно-практической конференции. Под общей редакцией В.А. Гулевского. - 2018. - С. 109-114.
22. Давтян А.Б. Оценка эффективности создания и эксплуатации энергетических лесных плантаций / А.Б. Давтян, О.А. Куницкая, М.Ф. Григорьев, Д.И. Степанова // *Энергоэффективность и энергосбережение в*

современном производстве и обществе. материалы международной научно-практической конференции. - 2019. - С. 61-65.

23. Kunickaya O. Cultivation of the targeted forest plantations / O. Kunickaya, V. Tanyukevich, D. Khmeleva, A. Kulik, E. Runova, V. Savchenkova, A. Voronova, M. Lavrov // *Journal of Environmental Treatment Techniques*. - 2020. - Т. 8. - № 4. - С. 1385-1393.

24. Кутявин И.Н. Роль лесных пожаров в структурной организации древостоев сосновых лесов Европейского Северо-Востока / И.Н.Кутявин // В сборнике: Актуальные проблемы биологии и экологии. Материалы докладов XXVIII Всероссийской молодежной научной конференции (с элементами научной школы). Отв. редактор С.В. Дегтева. Сыктывкар, 2021. С. 10-13.

References

1. Rudov S.E. Teoreticheskie issledovaniya ekologicheskoy sovместимости kolesnyh lesnyh mashin i merzlotnyh pochvogruntov lesov kriolitozony / S.E. Rudov, O.A. Kunickaya // *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. Отв. редактор N.S. Zaharov. - 2020. - С. 323-326.

2. Nikitina E.I. Proekt organizacii lesozagotovok v usloviyah Aldanskogo lesnichestva s primeneniem mnogooperacionnyh lesozagotovitel'nyh kompleksov / E.I. Nikitina, O.A. Kunickaya, F.V. Nikolaeva // *sovremennye problemy i dostizheniya agrarnoy nauki v Arktike. Sbornik nauchnyh statej po materialam Vserossijskoj studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem v ramkah «Severnogo foruma – 2020» (29–30 sentyabrya 2020 g., YAkutsk) i Mezhdunarodnoj nauchnoj on-lajn letnej shkoly – 2020 (6–20 iyulya 2020 g., YAkutsk)*. - 2020. - С. 138-148.

3. Kunickaya O.A. Ekologicheskie aspekty vyborochnykh rubok lesa / O.A. Kunickaya, E.I. Nikitina // *Ekologo-ekonomicheskie i tekhnologicheskie aspekty ustojchivogo razvitiya Respubliki Belarus' i Rossijskoj Federacii. sbornik statej III Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Minskie nauchnye chteniya-2020": v 3 tomah. Belorusskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet, Predstavitel'stvo federal'nogo agentstva po delam SNG, sootchestvennikov, prozhivayushchih za rubezhom, i po mezhdunarodnomu gumanitarnomu sotrudnichestvu (Rossotrudnichestvo) v Respublike Belarus'. Minsk, - 2021. - С. 286-291.*

4. Kunickaya O.A. Osobennosti lesozagotovki v Respublike Saha YAkutiya / O.A. Kunickaya, E.I. Nikitina, F.V. Nikolaeva // *Upravlenie zemelnymi resursami, zemleustrojstvo, kadastr, geodeziya i kartografiya. Problemy i perspektivy razvitiya. Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 255-letiyu Zemleustrojstvu YAkutii i Godu nauki i tekhnologii. YAkutsk, - 2021. - С. 308-313.*

5. González de Andrés, E. Interactions between climate and nutrient cycles on forest response to global change: the role of mixed forests // *Forests*. – 2019. – Т. 10. – № 8. – P. 609. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10080609>.

6. Gong, Y. Characterizing Growing Season Length of Subtropical Coniferous Forests with a Phenological Model / Y. Gong, C.L. Staudhammer, S. Wiesner et al. // *Forests*. – 2021. – Vol. 12. – № 1. – P. 95. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12010095>.

7. Downing W.M. How do plant communities differ between fire refugia and fire-generated early-seral vegetation? / W.M. Downing, M.A. Krawchuk, G.W. Meigs, C. Tortorelli, J.D. Coop, R.B. Walker, S.L. Haire, E. Whiteman, G. Chong, C. Miller // *Journal of Vegetation Science*. 2020. Т. 31. № 1. С. 26-39.

8. Grau-Andrés, R. Responses of bryosphere fauna to drought across a boreal forest chronosequence / R. Grau-Andrés, S. Thieffry, S. Tian et al. // *Oecologia*. 2022. Vol. 200. № 1-2. P. 231-245. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-022-05255-z>.

9. Stephenson, S.L. Assemblages of myxomycetes associated with three different substrates affected by forest wildfires / S.L. Stephenson, N. Payal, G. Kaur, C. Rojas // *Plant Ecology and Evolution*. – 2021. – Vol. 154. – № 1. – P. 15-27. DOI: <https://doi.org/10.5091/plecevo.2021.1762>.

10. Ponce-Calderón, L. Historical fire ecology and its effect on vegetation dynamics of the Lagunas de Montebello National Park, Chiapas, México / L. Ponce-Calderón, D. Rodríguez-Trejo, J. Villanueva-Díaz et al. // *iForest - Biogeosciences and Forestry*. 2021. Vol. 14. № 6. P. 548-559. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor3682-014>.
11. João, T. Indicator-based assessment of post-fire recovery dynamics using satellite NDVI time-series / T. João, G. João, M. Bruno, H. João // *Ecological Indicators*. – 2018. – Vol. 89. – P. 199-212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.008>.
12. Zhila S.V. Lesovozobnovlenie posle pozharov raznoj intensivnosti v sosnyakah srednej Sibiri / S.V. Zhila, G.A. Ivanova, V.A. Ivanov, P.A. Cvetkov // *Sibirskij lesnoj zhurnal*. - 2019. - № 6. - S. 53-62.
13. Glushko S.G. Formation of young trees after logging and fires in dark coniferous sedge-fern forests of southern Sikhote-Alin / S.G. Glushko, T.A. Komarova, N.B. Prokhorenko // *Forest management*. 2022. No. 2. pp. 144-156.
14. Bikbaeva A.Yu., Makarov A.A., Nagovitsyn V.N. Post-fire restoration of vegetation cover of the northern part / Primorsky ridge / A.Yu. Bibaeva., A.A. Makarov., V.N. Nogovitsyn // *Geographical Bulletin*. 2022. No. 3 (62). pp. 6-18. 2. pp. 144-156.
15. Gabysheva L.P. Reforestation in the burning areas of Southwestern Yakutia (on the example of the Olekminsky district) / L.P. Gabysheva // *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018. Vol. 20. No. 5-3 (85). pp. 335-340.
16. Kirbizhekova I.I., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Baltukhaev A.K., Dagurov P.N. Investigation of pine forest restoration after a fire based on polarimetric and optical data at a test site of the Baikal region / I.I. Kirbizhekova., T.N. Chimitdorzhiev., A.V. Dmitriev., A.K. Baltukhaev., P.N. Dagurov.// In the book: *Materials of the 19th International Conference "Modern Problems of remote sensing of the Earth from space"*. Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 2021. p. 352
17. Litvinceva Z.O. Sovremennyye preobrazovaniya geosistem zapadnogo makrosklona Barguzinskogo hrebta / Z.O. Litvinceva // *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*. 2021. T. 38. S. 88-99.
18. Sobolev S.A., Denisov A.N., Kolchin E.A. The influence of the pyrogenic factor on natural ecosystems / S.A. Sobolev., A.N. Denisov., E.A. Kolchin. // In the collection: *Modern research in Earth Sciences: a retrospective, current trends and prospects for implementation. Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Compiled by N.S. Shuvaev, E.A. Kolchin, D.A. Penzer. 2019. pp. 63-69. "Modern problems of remote sensing of the Earth from space". Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 2021. p. 352.
19. Gyninova A.B., Ubugunov L.L., Kulikov A.I., Gyninova B.D., Gonchikov B.M.N., Badmaev N.B., Sampilova D.P. Post-fire evolution of forest ecosystems on sandy terraces of the Southeastern Baikal region. / A.B. Gyninova., L.L. Ubugunov., A.I. Kulikov., B.D. Gyninova., B.M.N. Gonchikova., N.B., Badmaev D.P. Sampilova // *Siberian Ecological Journal*. 2020. Vol. 27. No. 1. pp. 13-25.
20. Morkovina S.S. Ocenka ekonomicheskikh ugroz lesnykh pozharov ekspertnym metodom / S.S. Morkovina, V.V. Manmareva // *Strategii protivodejstviya ugrozam ekonomicheskoy bezopasnosti Rossii. Materialy II Vserossijskogo foruma po ekonomicheskoy bezopasnosti. Vypusk II*. - 2019. - S. 245-249.
21. Kunickaya O.A. Perspektivnye napravleniya razvitiya transportno-tekhnologicheskikh sistem lesnogo kompleksa Rossii / O.A. Kunickaya, D.I. Stepanova, M.F. Grigor'ev // *Energoeffektivnost' i energo-sberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Pod obshchey redakciej V.A. Gulevskogo*. - 2018. - S. 109-114.
22. Davtyan A.B. Ocenka effektivnosti sozdaniya i ekspluatatsii energeticheskikh lesnykh plantacij / A.B. Davtyan, O.A. Kunickaya, M.F. Grigor'ev, D.I. Stepanova // *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve. materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. - 2019. - S. 61-65.

23. Kunickaya O. Cultivation of the targeted forest plantations / O. Kunickaya, V. Tanyukevich, D. Khmeleva, A. Kulik, E. Runova, V. Savchenkova, A. Voronova, M. Lavrov // Journal of Environmental Treatment Tech-niques. - 2020. - Т. 8. - № 4. - S. 1385-1393.

24. Kutyavin I.N. The role of forest fires in the structural organization of stands of pine forests of the European Northeast / I.N. Kutyavin // In the collection: Actual problems of biology and ecology. Materials of the reports of the XXVIII All-Russian Youth Scientific Conference (with elements of a scientific school). Editor S.V. Degteva. Syktyvkar, 2021. pp. 10-13.

Сведения об авторах

✉ *Григорьева Ольга Ивановна* – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры Лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, e-mail: grigoreva_o@list.ru.

Гринько Олег Иванович – аспирант ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», ул. Макаренко, 40, Братск, 665709, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1011-0329>, e-mail: goi2@yandex.ru

Григорьев Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор кафедры технология и оборудование лесного комплекса ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», шоссе Сергеляхское, 3 км., 3, г. Якутск, Российская федерация, 677007; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru

Калита Евгений Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры Экология, ресурсопользование и безопасность жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», ул. Тихоокеанская, 136, г. Хабаровск, Российская Федерация, 680035, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6279-2742>, e-mail: 007203@pnu.edu.ru

Тихонов Евгений Андрьянович – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных и технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petsu.ru

Information about authors

✉ *Olga I. Grigoreva* – Associate Professor of the Department of Forestry, Saint Petersburg state forest engineering university named after S.M. Kirov, Institutsky lane, 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>, e-mail: grigoreva_o@list.ru

Oleg I. Grinko – Postgraduate student of the Bratsk State University, 40 Makarenko str., Bratsk, 665709, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1011-0329>, e-mail: goi2@yandex.ru

Igor V. Grigorev - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology and Equipment of the Forestry Complex, Arctic State Agrotechnological University, Sergelyakhskoe highway, 3, km. 3, Yakutsk, Russian Federation, 677007; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, e-mail: silver73@inbox.ru

Evgeny G. Kalita – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Ecology, Resource Use and Life Safety, Pacific State University, 136 Ti-khookeanskaya Str., Khabarovsk, Russian Federation, 680035, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6279-2742>, e-mail: 007203@pnu.edu.ru

Evgeny A. Tikhonov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Machines and Equipment, Petrozavodsk State University, ave. Lenin, 33, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2136-3268>, e-mail: tihonov@petsu.ru

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/7>

УДК 630.181.2:582.475



Изменчивость репродуктивного развития полусибов плюсовых деревьев *Pinus sibirica* Du Tour

Римма Н. Матвеева, matveevrn@yandex.ru 0000-0002-3476-9622

Юлия Е. Щерба, shcherba@mail.ru 0000-0002-8437-4274

Наталья А. Шенмайер , schenmaier@yandex.ru 0000-0001-8879-4412

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация

Выделение плюсовых деревьев *Pinus sibirica* Du Tour по семенной продуктивности, отбор и размножение полусибов, отличающихся обилием шишек и пыльцы, служат основой для создания высокоурожайных плантаций целевого назначения. Целью исследований явилось выделить семьи, где наблюдается большой процент деревьев раннего репродуктивного развития и экземпляры с наибольшим содержанием шишек и побегов с мужскими соцветиями, отселектировать экземпляры в разных семьях плюсовых деревьев по раннему репродуктивному развитию с учётом образования шишек и пыльцы. Предметом исследования явилось семенное потомство плюсовых деревьев в 31-35-летнем биологическом возрасте, выращиваемое на территории дендрария СибГУ им. М.Ф. Решетнева, участок «Продолжение геошколы» (55°58' с.ш., 92°37' в.д., 287 м НУМ). Первоначально среди аттестованных плюсовых деревьев по семенной продуктивности были отобраны для размножения пять плюсовых деревьев, произрастающих в Иркутской (60/24) и Новосибирской области (98/62, 102/66, 106/70 и 110/74). Условия произрастания и показатели деревьев приведены из паспортов, составленных комиссией при их аттестации. С этих деревьев были собраны шишки, проведен посев семян, выращен посадочный материал, который пересажен на участок дендрария СибГУ. В 2018, 2021 и 2022 гг. у полусибов раннего репродуктивного развития определяли количество шишек, микростробиллов с использованием бинокля. Отмечается *изменчивость проявления раннего репродуктивного развития полусибов по образованию шишек как между семьями плюсовых деревьев (от 7,8 до 25,3 шт.), так и внутри семей (60/24 – 2-22 шт.; 98/62 – 2-115 шт.; 102/66 – 4-45 шт.; 106/70 – 1-54 шт.; 110/74 – 1-15 шт.). Отбор экземпляров по крупности шишек не проводился. Некоторые экземпляры образовали и шишки, и пыльцу: 82-7, 85-10 и 87-13 в семье плюсового дерева 60/24; 72-11, 79-2, 79-3, 79-4, 79-8, 80-3, 81-4, 85-22 (семья 98/62); 83-1, 83-6, 83-9, 84-2, 84-4, 86-9, 86-11 (семья 102/66); 78-3, 78-9, 81-8, 81-9, 81-10, 85-19 (семья 106/70); 79-9, 84-12, 86-5 (семья 110/74). Данные экземпляры представляют селекционную ценность и могут найти широкое применение при их вегетативном размножении и создании высокоурожайных плантаций раннего репродуктивного развития.*

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour), полусибовы плюсовых деревьев, изменчивость, отбор, раннее репродуктивное развитие

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Матвеева Р. Н. Изменчивость репродуктивного развития полусибов плюсовых деревьев *Pinus sibirica* Du Tour / Р. Н. Матвеева, Ю. Е. Щерба, Н. А. Шенмайер // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 99–111. – Библиогр.: с. 107–110 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/7>.

Поступила 05.12.2022. *Пересмотрена* 19.04.2023. *Принята:* 21.04.2023. *Опубликована онлайн:* 15.05.2023.

Article

Variability of reproductive development of half-sibs of *Pinus Sibirica* Du Tour

Rimma N. Matveeva, matveevrn@yandex.ru  0000-0002-3476-9622

Iuliia E. Shcherba, shcherba@mail.ru  0000-0002-8437-4274

Natalya A. Schenmaier , schenmaier@yandex.ru  0000-0001-8879-44-12

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Imeni gazety "Krasnoyarskiy rabochiy" Ave., 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

Abstract

Selection of *Pinus sibirica* Du Tour plus trees by seed productivity, breeding of half-sibs, characterized by an abundance of cones and pollen, serve as the basis for the creation of high-yielding target plantations. The aim of the research was to select families with a large percentage of early reproductive development's trees, and specimens with a lot of cones and shoots with male inflorescences. Also, to select specimens in different families of *Pinus sibirica* Du Tour plus trees by early reproductive development, taking into account the formation of cones and pollen. The subject of the study was the seed progeny of *Pinus sibirica* Du Tour trees at biological age of 31-35 years, grown on the territory of the arboretum of Reshetnev University, the site «Prodolzhenie geoshkoly» (55°58'N, 92°37'E, 287 meters above sea level). Initially, five plus trees growing in Irkutsk (60/24) and Novosibirsk regions (98/62, 102/66, 106/70 and 110/74) for reproduction among certified plus trees by seed productivity were selected. The growing conditions and indicators of plus trees from the certificate drawn up by the commission during their certification are given. Cones from these trees were collected, then seeds were sown and planting material was grown, which was transplanted to the site of the arboretum of Reshetnev University. In 2018, 2021 and 2022, the number of cones and microstrobiles in early reproductive development semis by using binoculars was determined. The variability by early reproductive development of half-sibs in the formation of cones both between families of plus trees (от 7,8 до 25,3 psc.), and within families (60/24 – 2-22 psc.; 98/62 – 2-115 psc.; 102/66 – 4-45 psc.; 106/70 – 1-54 psc.; 110/74 – 1-15 psc.) is noted. The selection of specimens by the size of the cones was not carried out. Some specimens formed both cones and pollen: 82-7, 85-10 and 87-13 in the family of the plus trees 60/24; 72-11, 79-2, 79-3, 79-4, 79-8, 80-3, 81-4, 85-22 (family 98/62); 83-1, 83-6, 83-9, 84-2, 84-4, 86-9, 86-1 (family 102/66); 78-3, 78-9, 81-8, 81-9, 81-10, 85-19 (family 106/70); 79-9, 84-12, 86-5 (family 110/74). Selected specimens have a huge value and can be widely used in their vegetative reproduction and the creation of high-yielding plantations of early reproductive development.

Keywords: *Pinus sibirica* Du Tour, half-sibs of plus trees, variability, selection, early reproductive development

Funding: This research received no external funding.

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

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

For citation: Matveeva R. N., Shcherba Iu E., Schenmaier N. A. (2023). Variability of reproductive development of half-sibs of *Pinus sibirica* Du Tour. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 99-111 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/7>.

Received 05.12.2022. *Revised* 19.04.2023 *Accepted* 21.04.2023. *Published online* 15.05.2023

Введение

Сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica* Du Tour) является ценной древесной породой, отличающейся образованием кедровых орехов, содержащих комплекс необходимых для жизнедеятельности веществ, таких как белки, жиры, углеводы, аминокислоты, микроэлементы и др. [1-3].

О выращивании посадочного материала, создании лесных культур и лесосеменных плантаций *Pinus sibirica* DuTour имеется ряд научных публикаций: Е. В. Жигулин [4], А.А. Алейников и др. [5], М.Н. Казанцева, М.М. Спасибова [6], Р.Н. Матвеева, О.Ф. Буторова [7], Е.В. Titov [8], Ю.Е Щерба и др. [9], В.В. Нарзязев и др. [10].

В публикациях S. Velisevicha, A. Popova [11], О.В. Паркиной и др. [12], Г. В. Кузнецовой [13], R. S. Khamitova и др. [14], Т.С. Седелниковой и др. [15], С. Н. Горошкевича [16], N. Debkova [17], S.N. Goroshkevich и др. [18] исследовались аспекты, связанные с репродуктивной сферой *Pinus sibirica* Du Tour как в природных условиях, так и при искусственном выращивании (лесные культуры и плантации).

Создание урожайных лесосеменных плантаций с использованием потомств плюсовых деревьев, отобранных по семенной продуктивности, позволяет отселектировать генетически ценные экземпляры по данному показателю во втором поколении.

Цель исследований – повышение семенной продуктивности создаваемых плантаций с использованием отселектированных экземпляров раннего репродуктивного развития и обильного семеношения в семьях плюсовых деревьев.

Для достижения цели определили следующие задачи:

1. Выделить семьи, где наблюдается большой процент деревьев раннего репродуктивного

развития и экземпляры с наибольшим содержанием шишек и побегов с мужскими соцветиями.

2. Отселектировать экземпляры *Pinus sibirica* Du Tour в разных семьях плюсовых деревьев по раннему репродуктивному развитию с учетом образования шишек и пыльцы.

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Предмет исследования – семенное потомство плюсовых деревьев *Pinus sibirica* DuTour в 31-35-летнем биологическом возрасте, выращиваемое на территории дендрария СибГУ им. М.Ф. Решетнева, опытный участок «Продолжение геошколы» (55°58' с.ш., 92°37' в.д., 287 м НУМ). Характеристика материнских плюсовых деревьев на период сбора семян (осень 1987 г.) для создания опытного участка приведена в табл. 1. Возраст плюсовых деревьев составлял 120-140 лет. Наибольший процент превышения по высоте (26 %), диаметру ствола (54 %) в сравнении со средними значениями в насаждении был у плюсового дерева 60/24.

Объектом исследования явились показатели репродуктивного развития семенного потомства пяти плюсовых деревьев: количество шишек на дереве, на побеге (в пучке), побегов с мужскими соцветиями.

Дизайн эксперимента

Плюсовые деревья *Pinus sibirica* Du Tour были размножены посевом семян осенью 1987 г. Полусибы плюсовых деревьев в количестве 30 шт. каждой семьи были пересажены на участок «Продолжение геошколы» в дендрарии СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Расстояние между посадочными местами составило 4×4 м. Наблюдения за репродуктивным развитием полусибов от плюсовых деревьев проводили в 2018, 2021 и 2022 годах.

У каждого полусиба в пяти семьях определяли следующие показатели:

Таблица 1

Возраст, высота и диаметр ствола материнских плюсовых деревьев *Pinus sibirica* Du Tour в сравнении со средними значениями в лесных насаждениях

Table 1

Age, height and trunk diameter of mother plus trees of *Pinus sibirica* Du Tour compared to forest stands averages

Номер плюсового дерева Plus tree number	Место произрастания Provenance	Возраст, лет Age, years	Высота Height		Диаметр ствола Trunk diameter	
			м m	% к X_{cp} . в насаждении % to X_{av} . in the planting	см cm	% к X_{cp} . в насаждении % to X_{av} . in the planting
60/24	Иркутская обл. Irkutsk region	130	24	126	40	154
98/62	Новосибирская обл. Novosibirsk region	140	19	105	65	125
102/66		120	20	111	52	100
106/70		120	20	111	55	105
110/74		140	21	116	67	129

Источник: паспорта, составленные комиссией при аттестации плюсовых деревьев

Source: certificate, drawn up by the commission during plus trees certification

– количество шишек на дереве,
– количество шишек на побеге (в пучке),
– количество побегов с мужскими соцветиями (микростробилами) с использованием бинокля, суммируя показатели с разных сторон дерева.

Анализ данных

Обработку экспериментальных данных проводили с использованием стандартного пакета Microsoft Office Excel 2016.

Ежемесячные показатели температуры и осадков за период наблюдений приведены в табл. 2. Наибольшее количество осадков выпало в 2021 г. (564 мм). Минимальная температура воздуха была в 2021 и в 2018 г.г. (-20,5 и -20,2 °C), максимальная – в 2018 и 2021 г.г. (19,8 и 19,6 °C). Искусственный полив на опытном участке не проводился. Количество деревьев, образовавших шишки, зависит в основном от их возраста. В 31-летнем возрасте урожайных деревьев было 4,8 %, в 34-летнем - 61,0 %, 35-летнем - 90,2 %. Изменчивость проявляется и по количеству шишек на дереве в одинаковых климатических условиях.

Результаты и обсуждение

Процент полусибов плюсовых деревьев *Pinus sibirica* Du Tour раннего репродуктивного раз-

вития, образовавших шишки и микростробилы в 2018, 2021 и 2022 гг. приведен в табл. 3.

Формирование шишек у экземпляров, вступивших в репродуктивную фазу развития в 2018 году, отмечено только у единичных полусибов в семье 102/66. В 2021 году этот показатель варьировал от 20,0 до 100,0 %, в 2022 г. – от 66,7 до 100,0 %. В 2021 г. наибольший процент деревьев с шишками был в семьях плюсового дерева 102/66, в 2022 г. – 98/62 и 110/74.

В 2018 г. в 31-летнем биологическом возрасте полусибы образовали микростробилы в семьях плюсовых деревьев 60/24, 98/62 и 102/66. Наибольший процент полусибов, образовавших пыльцу, отмечен в семье 102/66. Не образовали микростробилы полусибы в семьях 106/70 и 110/74. В 2021 году образование пыльцы отмечено у 63,6-75,0 % полусибов в разных семьях.

Образование шишек у полусибов разных семей приведено в табл. 4, сравнительный анализ – на рис. 1.

Образование шишек в 31-летнем возрасте (2018 г.) отмечено у полусибов 86-9, 84-2 в семье плюсового дерева 102/66. Экземпляр 86-9 отличался также образованием шишек в 2021 и 2022 гг. Суммарное количество шишек за 2018, 2021 и 2022 гг. составило 45 шт., что на 143,2 % больше в сравнении со средним значением по опыту. В 34-летнем воз-

расте изменчивость по количеству шишек у семеносящих деревьев была от 1 до 30 шт. (2021 г.). Наибольший показатель отмечен у полусиба 72-11 семьи плюсового дерева 98/62. В 35-летнем возрасте по количеству шишек лидировали полусибы 72-11 (семья 98/62), 81-8 (семья 106/70). Количество шишек за трехлетний период у полусибов, вступивших в фазу семеношения, в среднем по опыту составило 18,5 шт. Наибольший суммарный показатель был у полусиба 72-11 в семье плюсового дерева 98/62 (115 шт.); 81-8 плюсового дерева 106/70 (54 шт.); 86-9 (45 шт.) и 83-6 (43 шт.) семьи 102/66.

Кроме этого, выделены экземпляры, содержащие максимальное количество шишек «в пучке» (3 шт.). К ним отнесены 82-7, 87-13 (семья 60/24); 72-11, 72-19 (семья 98/62); 83-6, 86-11 (102/66); 80-9, 81-8, 81-10 (106/70).

У полусибов количество побегов с наличием мужских соцветий колебалось в больших пределах. В 2018 г. были выделены по данному показателю полусибы 82-8 в семье 60/24 (80 шт.), 86-9 в семье 102/66 – 35 шт. По сумме ветвей, имеющих пыльники, отобраны экземпляры 81-11, 86-9 в семье плюсового дерева 102/66. Превышение над средним значением по опыту составило 250,9 % и 139,1 %, соответственно. В семье 106/70 выделен экземпляр 85-19 (превышение 160,9 %), в семье 110/74 экземпляры 84-12 (73,9 %) и 86-5 (39,8 %).

Среднее количество шишек и побегов с мужскими соцветиями на полусибах между семьями плюсовых деревьев колебалось значительно: от 7,8 шт. (семья 110/74) до 25,3 шт. (семья 98/62) по количеству шишек и от 24,2 шт. (семья 106/70) до 52,2 шт. (семья 60/24) по количеству побегов с мужскими соцветиями (рис. 2).

Некоторые экземпляры образовали и шишки, и пыльцу: 82-7, 85-10 и 87-13 в семье плюсового дерева 60/24; 72-11, 79-2, 79-3, 79-4, 79-8, 80-3, 81-4, 85-22 (семья 98/62); 83-1, 83-6, 83-9, 84-2, 84-4, 86-9, 86-11 (семья 102/66); 78-3, 78-9, 81-8, 81-9, 81-10, 85-19 (семья 106/70); 79-9, 84-12, 86-5 (семья 110/74).

Анализ полусибов плюсовых деревьев по репродуктивному развитию в 31-, 34- и 35-летнем возрасте показал значительное проявление изменчивости межсемейственной и индивидуальной

внутри семей. С. Н. Велисевич, А. В. Попов [19] отмечали проявление изменчивости урожайности в зависимости от генотипа у деревьев 40-летнего возраста на плантации семенного происхождения, созданной из семян местной популяции. В.В. Нарзев и др. [10] сопоставляли количество шишек у рамет от плюсовых деревьев по семенной продуктивности при возрасте привоя 29 лет. Р.А. Третьякова, О.В. Паркина [20] в условиях Искитимского лесничества Новосибирской области установили взаимосвязи и характер изменчивости семенной продуктивности с основными биометрическими показателями. S. Velisevich, A. Popov [11] предлагают вести заготовку семян сосны кедровой сибирской на специальных плантациях, созданных с использованием высокоурожайных клонов. Ю.Е. Щерба и др. [9] установили изменчивость 36-летних полусибов по образованию шишек и макростробилов на лесосеменной плантации в Ермаковском лесничестве Красноярского края.

На участке «Продолжение геошколы» дендрария СибГУ им. М.Ф. Решетнева были отобраны экземпляры раннего репродуктивного развития по образованию шишек, числу шишек в пучке (многошишечная форма), количеству побегов с мужскими соцветиями и комплексу этих факторов. Данные экземпляры представляют большую селекционную ценность и могут служить маточными для размножения и использования при создании плантаций раннего репродуктивного развития в качестве семенников и опылителей по определенным схемам смешения в условиях пригородной зоны Красноярска.

Выводы

1. Отобраны полусибы плюсовых деревьев раннего репродуктивного развития, имеющие наибольшее количество шишек за трехлетний период: в семье 60/24 - № 82-7 (22 шт.); семья 98/62 - № 72-11 (115 шт.), 73-13 (30 шт.), 79-4 (26 шт.), 74-17, 72-19, 81-4 (по 25 шт.); семья 102/66 - № 86-9 (45 шт.), 83-6 (43 шт.), 83-1 (21 шт.), семья 106/70 - № 81-8 (54 шт.), 85-19 (31 шт.), 81-10 (26 шт.).

2. Отобраны экземпляры плюсовых деревьев раннего репродуктивного развития, образовавшие и шишки и пыльцу: 82-7, 85-10 и 87-13 в семье плюсового дерева 60/24; 72-11, 79-2, 79-3, 79-

Природопользование

4, 79-8, 80-3, 81-4, 85-22 (семья 98/62); 83-1,83-6,
83-9, 84-2, 84-4, 86-9, 86-11 (семья 102/66); 78-3, 78-

9, 81-8, 81-9, 81-10,85-19 (семья 106/70); 79-9, 84-
12, 86-5 (семья 110/74).

Таблица 2

Климатические показатели

Table 2

Climate indicators

Месяц Month	Средняя месячная температура воздуха, °С average monthly air temperature, °С			Средние месячные суммы выпавших осадков, мм average monthly rainfall amounts, mm		
	2018 г. 2018 y.	2021 г. 2021 y.	2022 г. 2022 y.	2018 г. 2018 y.	2021 г. 2021 y.	2022 г. 2022 y.
Январь January	-20,2	-20,5	-12,2	27	37	6
Февраль February	-13,9	-14,4	-11,8	7	32	11
Март March	-5,6	-3,9	-6,2	16	13	17
Апрель April	4,0	2,7	5,5	11	38	21
Май May	7,9	10,1	14,0	38	39	15
Июнь June	19,8	15,5	16,8	55	102	63
Июль July	17,7	19,6	17,6	41	71	52
Август August	18,0	17,4	14,9	30	76	77
Сентябрь September	10,3	8,1	9,5	115	29	66
Октябрь October	5,4	2,9	3,0	27	44	25
Ноябрь November	-8,6	-4,1	-7,1	72	43	30
Декабрь December	-19,3	-11,6	-13,5	29	40	10
Σ осадков, мм Σ rainfall, mm				468	564	393

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 3

Образование репродуктивных органов у экземпляров раннего репродуктивного развития в семьях плюсовых
деревьев

Table 3

Formation of reproductive organs of early reproductive development specimens in families of plus trees

Номер плюсового дерева (семьи) Plus tree (family) number	с шишками, % with cones, %			с микростробилами, % with mi- crostrobiles, %	
	2018 г. 2018 y.	2021 г. 2021 y.	2022 г. 2022 y.	2018 г. 2018 y.	2021 г. 2021 y.
60/24	0,0	20,0	66,7	66,7	66,7
98/62	0,0	75,0	100,0	30,0	75,0
102/66	25,0	100,0	90,0	75,0	66,7
106/70	0,0	72,7	66,7	0,0	63,6
110/74	0,0	50,0	100,0	0,0	75,0

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Природопользование

Таблица 4

Полусибы, образовавшие шишки в разных семьях плюсовых деревьев

Table 4

Selected half-sibs by the formation of cones

Номер Number		Количество шишек, шт. Number of cones, pcs.					максимальное «в пучке» maximum "in the bunch"	
		на дереве on the tree						
плюсового дерева (семьи) plus tree (family)	полусиба half-sib	2018 г.	2021 г.	2022 г.	итого total	% к $X_{cp.}$ % to $X_{av.}$		
60/24	82-7	0	0	22	22	118,9	3	
	82-12	0	0	2	2	10,8	2	
	85-10	0	6	4	10	54,1	2	
	87-13	0	0	16	16	86,5	3	
98/62	72-11	0	30	85	115	621,6	3	
	72-19	0	0	25	25	135,1	3	
	73-13	0	0	30	30	162,2	2	
	74-17	0	0	25	25	135,1	2	
	79-2	0	2	6	8	43,2	2	
	79-3	0	3	6	9	48,6	2	
	79-4	0	10	16	26	140,5	2	
	79-8	0	0	15	15	81,1	2	
	80-3	0	0	6	6	32,4	2	
	81-4	0	23	2	25	135,1	2	
	81-6	0	0	2	2	10,8	2	
	85-22	0	12	6	18	97,3	2	
	102/66	83-1	0	9	12	21	113,5	2
		83-5	0	0	13	13	70,3	2
83-6		0	21	22	43	232,4	3	
83-8		0	6	1	7	37,8	1	
83-9		0	7	2	9	48,6	2	
84-2		3	1	0	4	21,6	2	
84-4		0	3	12	15	81,1	2	
86-8		0	11	2	13	70,3	2	
86-9		3	20	22	45	243,2	2	
86-11		0	4	14	18	97,3	3	
106/70	78-3	0	17	0	17	91,9	2	
	78-9	0	6	12	18	97,3	2	
	79-6	0	0	9	9	48,6	2	
	79-7	0	1	0	1	5,4	1	
	80-9	0	0	15	15	81,1	3	
	80-12	0	0	9	9	48,6	2	
	81-8	0	7	47	54	291,9	3	
	81-9	0	2	3	5	27,0	1	
	81-10	0	6	20	26	140,5	3	
	85-11	0	2	0	2	10,8	2	
110/74	85-19	0	24	7	31	167,6	2	
	79-9	0	0	2	2	10,8	2	
	84-12	0	6	7	13	70,3	2	
	84-15	0	0	1	1	5,4	1	
	86-5	0	11	4	15	81,1	2	
Среднее значение по опыту Average value by experience					18,5	100,0	1,8	

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Природопользование

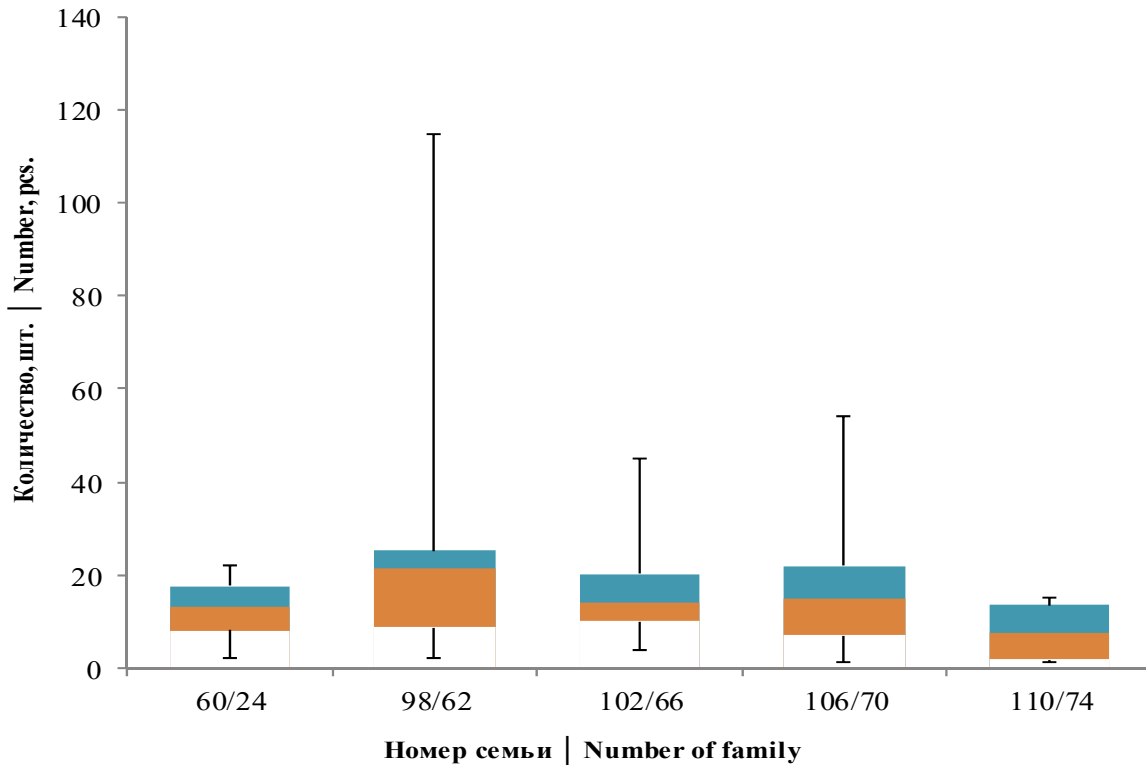


Рисунок 1. Сравнительный анализ количества шишек у полусибов в разных семьях
 Figure 1. Comparative analysis of the number of cones of half-sibs in different families

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

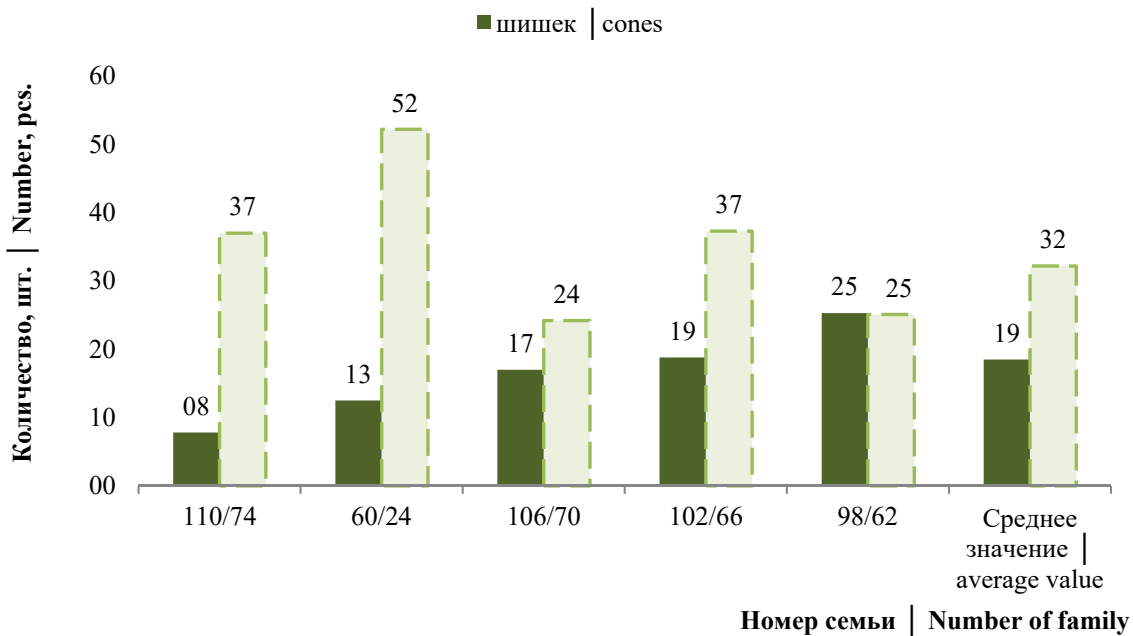


Рисунок 2. Среднее количество шишек и побегов с микростробилами на полусибах в семьях плюсовых деревьев

Figure 2. The average number of cones and shoots with microstrobiles on half-sibs in families of plus trees

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Список литературы

1. Матвеева Р. Н., Братилова Н. П., Кубрина С. М., Щерба Ю. Е. Содержание микроэлементов в семенах и хвое сосны кедр сибирского разного географического происхождения. Лесоведение. 2019; 6:567–572. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41151931>
2. Ивлиева В. Г., Череменина Н. А. Оценка биологических свойств кедрового ореха. Сборник материалов Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 15-летию со дня образования института биотехнологии и ветеринарной медицины «Актуальные вопросы развития аграрной науки». Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2021;163-167. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47439861&pff=1>
3. Шевченко Н. Ю., Гайвас А. А., Дегтярев А. И. Изменение питательности семян сосны сибирской кедровой в период созревания в условиях Омской области. Инновационные технологии пищевых производств : Материалы международной научно-практической конференции, Омск, 15 декабря 2021 года. Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2021:162-165. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49922262&pff=1>
4. Жигулин Е. В. Роль генетико-селекционного комплекса в интенсификации лесопользования. Вестник биотехнологии. 2019;2:11-11. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41125862>
5. Алейников А. А., Балухта Л. П., Деревянко С. О. Лесные культуры кедр сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour) в Брянской области по таксационным данным. Научные основы устойчивого управления лесами: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию ЦЭПЛ РАН, Москва, 25–29 апреля 2022 года. Москва: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН. 2022:13-15. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49184226>
6. Казанцева М. Н., Спасибова М. М. Продуктивность *Pinussibirica* в лесных культурах дендрария сибирской лесной опытной станции. Урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития : Материалы VI Международной научно-практической конференции, Ишим, 16 марта 2018 года. – Ишим: филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тюменский государственный университет» в г. Ишиме, 2018; 105-107. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32730825>.
7. Матвеева Р.Н., Буторова О.Ф. Исследования по выращиванию сосны кедровой сибирской за многолетний период. Хвойные бореальной зоны. 2022; XL(5): 374-380. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49833407>.
8. Titov E. V. Bioecological aspects of plantation nut cultivation of Siberian cedar (*Pinus sibirica* Du Tour.) in Russia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;392(1):012069.DOI:<http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012069>.
9. Щерба Ю. Е., Копченко Д. Е., Поплюйкова М. В. Изменчивость 36-летних полусибов плюсовых деревьев кедр сибирского по репродуктивному развитию на плантации «Ермаки». Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. 2020;23:157-160. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44312778>
10. Нарзаяв В. В., Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф., Щерба Ю. Е. Изменчивость вегетативного потомства плюсовых деревьев кедр сибирского, аттестованных по стволовой или семенной продуктивности. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019;4(370):22-33. DOI:<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.22>.
11. Velisevich S., Popov A. Evaluation of cone and seed quality of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) for plus-tree selection. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 2022; 46(5):717-729. DOI: <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3037>

12. Паркина О. В., Третьякова Р. А., Галецкая Г. А. Динамика семеношения сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica*) в условиях Новосибирской области. Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2020;24(6):44-50. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-44-50>.
13. Кузнецова Г. В. Межпопуляционная изменчивость размера шишек и массы семян сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica* Du Tour). Хвойные бореальной зоны. 2022; 40(5):369-373. DOI 10.53374/1993-0135-2022-5-369-373. Режим доступа: <https://cloud.sibsau.ru/s/pXSr4GqmZtBF7MY>.
14. Khamitov R. S. et al. Variability of Siberian stone pine seed yield in introduction plantations in the Vologda region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;979(1):012010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012010>.
15. Седельникова Т. С., Пименов А. В., Ефремов С. П., Муратова Е. Н. Особенности мужской генеративной сферы сосны сибирской в лесоболотных экотопах Западной Сибири. Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2018;1:28-36. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002332918010046>
16. Горошкевич С. Н. Метеорологическая обусловленность семеношения кедрового сибирского (*Pinus sibirica* Du Tour). Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021;2(380):56-69. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45153017>.
17. Debkov N. Accelerated formation of Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) stands: a case study from Siberia. Journal of Forest Science. 2019; 65:291-300. DOI: <https://doi.org/10.17221/48/2019-JFS>.
18. Goroshkevich S.N., Velisevich S.N., Zhuk E.A. et al. Cone Production of Stone Pines in the South of Western Siberia: Results of 30 Years of Monitoring. Contemp. Probl. Ecol. 15, 262–269 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425522030064>.
19. Велисевич С. Н., Попов А. В. Структура разнообразия по вегетативной и генеративной структуре кроны кедрового сибирского на плантации с разреженной посадкой. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019;5(371):35-47. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.35>.
20. Третьякова Р. А., Паркина О. В. Оценка биометрических признаков сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica*) в условиях Новосибирской области. Актуальные проблемы агропромышленного комплекса : Сборник трудов научно-практической конференции преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов Новосибирского ГАУ, Новосибирск, 21–22 октября 2020 года. Том Выпуск 5. Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета «Золотой колос», 2020;153-156. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44230432>.

References

1. Matveeva R.N., Bratilova N.P., Kubrina S.M., Shherba Ju.E. Soderzhanie mikrojelementov v semenah i hvoe sosny kedra sibirskogo raznogo geograficheskogo proishozhdenija [The content of microelements in seeds and needles of Siberian stone pine of different geographical origin]. Lesovedenie [Forest science]. 2019;6:567–572. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41151931>.
2. Ivlieva V. G., Cheremenina N. A. Ocenka biologicheskikh svojstv kedrovogo oreha. [Evaluation of the biological properties of pine nuts]. Sbornik materialov Vserossijskoj (nacional'noj) nauchno-prakticheskoj konferencii, posvjashhennoj 15-letiju so dnja obrazovaniya instituta biotekhnologii i veterinarnoj mediciny «Aktual'nye voprosy razvitiya agrarnoj nauki [Collection of materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference dedicated to the 15th anniversary of the establishment of the Institute of Biotechnology and Veterinary Medicine "Actual issues of the development of agricultural science] Tyumen: State Agrarian University of the Northern Trans-Urals. 2021;163-167. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47439861&ppf=1>.
3. Shevchenko N. Ju., Gajvas A. A., Degtjarev A. I. Izmenenie pitatel'nosti semjan sosny sibirskoj kedrovoj v period sozrevaniya v uslovijah Omskoj oblasti. [Changes in the nutritional value of seeds of Siberian cedar pine during the ripening period in the conditions of the Omsk region] Innovacionnye tehnologii pishhevych proizvodstv : Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Omsk, 15 dekabrja 2021 goda [Innovative technologies of food

production: Proceedings of the international scientific and practical conference, Omsk, December 15, 2021] Omsk: Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 2021:162-165. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49922262&pff=1>.

4. Zhigulin E. V. Rol' genetiko-selekcionnogo kompleksa v intensivifikacii lesopol'zovanija. [The role of the genetic-breeding complex in the intensification of forest management] Vestnik biotekhnologii [Bulletin of biotechnology]. 2019;2:11-11. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41125862>.

5. Alejnikov A. A., Baluhta L. P., Derevjanko S. O. Lesnye kul'tury kedra sibirskogo (*Pinus sibirica* Du Tour) v Brjanskoj oblasti po taksacionnym dannym [Forest plantations of Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) in the Bryansk region according to taxation data] Nauchnye osnovy ustojchivogo upravlenija lesami: Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, posvjashhennoj 30-letiju CJePL RAN, Moskva, 25–29 aprlja 2022 goda [Scientific Foundations of Sustainable Forest Management: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation Dedicated to the 30th Anniversary of the CEPL RAS, Moscow, April 25–29, 2022] Moscow: Center for Problems of Ecology and Productivity of Forests of the Russian Academy of Sciences. 2022;13-15. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49184226>.

6. Kazanceva M. N., Spasibova M. M. Produktivnost' *Pinus sibirica* v lesnyh kul'turah dendrarija sibirskoj lesnoj opytnoj stancii [Productivity of *Pinus sibirica* in forest cultures of the arboretum of the Siberian Forest Experimental Station]. Urbojekosistemy: problemy i perspektivy razvitija : Materialy VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Ishim, 16 marta 2018 goda. – Ishim: filial federal'nogo gosudarstvennogo bjudzhetnogo obrazovatel'nogo uchrezhdenija vysshego professional'nogo obrazovanija «Tjumenskij gosudarstvennyj universitet» v g. Ishime [Urban ecosystems: problems and development prospects: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference, Ishim, March 16, 2018. – Ishim: branch of the federal state budgetary educational institution of higher professional education "Tyumen State University" in Ishim]. 2018;105-107. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32730825>.

7. Matveeva R.N., Butorova O.F. Issledovanija po vyrashhivaniju sosny kedrovoj sibirskoj za mnogoletnij period [Research on the cultivation of Siberian cedar pine over a long period]. Hvojnye boreal'noj zony [Conifers of the boreal zone]. 2022;XL(5):374-380. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49833407>.

8. Titov E. V. Bioecological aspects of plantation nut cultivation of Siberian cedar (*Pinus sibirica* Du Tour.) in Russia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;392(1):012069.DOI:<http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012069>.

9. Shherba Ju. E., Kopchenko D. E., Popljukova M. V. Izmenchivost' 36-letnih polusibov pljusovyh derev'ev kedra sibirskogo po reproduktivnomu razvitiju na plantacii «Ermaki» [Variability of 36-year-old semi-sibs of Siberian cedar plus trees in terms of reproductive development on the Ermaki plantation]. Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukcija drevesnyh rastenij [Fruit growing, seed growing, introduction of woody plants]. 2020;23:157-160. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44312778>.

10. Narzjaev V. V., Matveeva R. N., Butorova O. F., Shherba Ju. E. Izmenchivost' vegetativnogo potomstva pljusovyh derev'ev kedra sibirskogo, attestovannyh po stvolovoj ili semennoj produktivnosti [Variability of Vegetative Progeny of Siberian Siberian Pine Plus Trees Certified for Stem or Seed Productivity]. Izvestija vysshih uczebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of higher educational institutions. Forest journal]. 2019;4(370):22-33. (In Russ.). DOI:<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.22>.

11. Velisevich S. N., Popov A. V. Struktura raznoobrazija po vegetativnoj i generativnoj strukture krony kedra sibirskogo na plantacii s razrezhennoj posadkoj. [The structure of diversity in the vegetative and generative structure of the Siberian stone pine crown on a plantation with a sparse planting]. Izvestija vysshih uczebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of higher educational institutions. Forest magazine]2019;5(371):35-47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.35>.

12. Parkina O. V., Tret'jakova R. A., Galeckaja G. A. Dinamika semenoshenija sosny kedrovoj sibirskoj (*Pinus sibirica*) v uslovijah Novosibirskoj oblasti [Dynamics of seed production of Siberian stone pine (*Pinus sibirica*) in the conditions of Novosibirsk region].

in the conditions of the Novosibirsk region]. *Lesnoj vestnik* [Forestry Bulletin]. 2020;24(6):44-50. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-44-50>.

13. Kuznecova G. V. Mezhpopuljacionnaja izmenchivost' razmera shishek i massy semjan sosny sibirskoj kedrovoj (*Pinus sibirica* Du Tour) [Interpopulation variability of cone size and seed weight of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour)]. *Hvojnye boreal'noj zony* [Conifers of the boreal zone]. 2022; 40(5):369-373. (In Russ.). DOI: 10.53374/1993-0135-2022-5-369-373 URL: <https://cloud.sibsau.ru/s/pXsr4GqmZtBF7MY>.

14. Khamitov R. S. et al. Variability of Siberian stone pine seed yield in introduction plantations in the Vologda region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022;979(1):012010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/979/1/012010>.

15. Sedel'nikova T. S., Pimenov A. V., Efremov S. P., Muratova E. N. Osobennosti muzhskoj generativnoj sfery sosny sibirskoj v lesobolotnyh jekotopah Zapadnoj Sibiri [Peculiarities of male generative sphere of Siberian pine in wetland ecotopes of Western Siberia]. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija biologicheskaja* [News of the Russian Academy of Sciences. Biological series]. 2018;1:28-36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002332918010046>

16. Goroshkevich S. N. Meteorologicheskaja obuslovlennost' semenoshenija kedra sibirskogo (*Pinus sibirica* Du Tour). *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest journal]. 2021;2(380):56-69. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45153017>.

17. Debkov N. Accelerated formation of Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) stands: a case study from Siberia. *Journal of Forest Science*. 2019; 65:291-300. DOI: <https://doi.org/10.17221/48/2019-JFS>.

18. Goroshkevich S.N., Velisevich S.N., Zhuk E.A. et al. Cone Production of Stone Pines in the South of Western Siberia: Results of 30 Years of Monitoring. *Contemp. Probl. Ecol.* 15, 262–269 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425522030064>.

19. Velisevich S., Popov A. Evaluation of cone and seed quality of Siberian stone pine (*Pinus sibirica* Du Tour) for plus-tree selection. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2022;46(5):717-729. DOI: <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3037>.

20. Tret'jakova R. A., Parkina O. V. Ocenka biometricheskikh priznakov sosny kedrovoj sibirskoj (*Pinus sibirica*) v uslovijah Novosibirskoj oblasti [Evaluation of Biometric Features of Siberian Cedar Pine (*Pinus sibirica*) in the Novosibirsk Region]. *Aktual'nye problemy agropromyshlennogo kompleksa : Sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferencii prepodavatelej, aspirantov, magistrantov i studentov Novosibirskogo GAU, Novosibirsk, 21–22 oktjabrja 2020 goda. Tom Vypusk 5* [Actual problems of the agro-industrial complex: Proceedings of the scientific and practical conference of teachers, graduate students, undergraduates and students of the Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, October 21–22, 2020. Volume Issue 5.]. Novosibirsk: Publishing Center of the Novosibirsk State Agrarian University "Zolotoy Kolos". 2020;153-156. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44230432>.

Сведения об авторах

Матвеева Римма Никитична – доктор с.-х. наук, профессор кафедры селекции и озеленения, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3476-9622>, e-mail: matveevrn@yandex.ru.

Щерба Юлия Евгеньевна – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры селекции и озеленения, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева», просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8437-4274>, e-mail: shcherba_@mail.ru.

✉ *Шенмайер Наталья Алексеевна* – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры селекции и озеленения, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева»,

просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, Российская Федерация, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8879-4412>, e-mail: schenmaier@yandex.ru.

Information about the authors

Rimma N. Matveeva – Dr. Sci. (Agric.), Professor of Breeding and Gardening Department in Institute of Forestry Engineering, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk territory, Siberian Federal District, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3476-9622>, e-mail: matveevrn@yandex.ru.

Iuliia E. Shcherba – Cand. Sci. (Agric.), Associate professor of Breeding and Gardening Department in Institute of Forestry Engineering, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave, с, Krasnoyarsk territory, Siberian Federal District, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-84-37-4274>, e-mail: shcherba_@mail.ru.

✉ *Natalya A. Schenmaier* – Cand. Sci. (Agric.), Associate professor of Breeding and Gardening Department in Institute of Forestry Engineering, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk territory, Siberian Federal District, Russian Federation, 660037, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8879-4412>, e-mail: schenmaier@yandex.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8>

УДК 630*232.311.9



Оценка качества лесосеменного материала на экспериментальном участке сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при адаптивном восстановлении лесных ландшафтов

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

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

При выборе технологии восстановления лесных ландшафтов весомым фактором является качество лесосеменного материала. Для разработки справочной информационной системы поддержки принятия решений для адаптивного восстановления лесных ландшафтов необходимо иметь данные о видах и качестве лесосеменного материала. Существующие исследования прямо или косвенно подтверждают, с одной стороны, влияние качества семян на качество будущих лесонасаждений, с другой стороны, влияние характеристик лесного массива на качество и количество семян. Сохранение качества лесосеменного материала в условиях масштабной заготовки семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) возможно при развитии постоянных лесосеменных участков, и (либо) применении современных технологий сепарирования лесных семян без потери генетического разнообразия и повышения не только всхожести и энергии прорастания семян, но и виталитета сеянцев, их устойчивости к изменению абиотических факторов. Deskриптивная статистика биометрических параметров деревьев и шишек сосны обыкновенной на экспериментальном участке (N51°50.00'; E39°22.09', 113 м НУМ) демонстрирует следующие значения (среднее; ошибка среднего): высота дерева (186.2; 11.7), диаметр корневой шейки дерева (5.9; 0.3), отношение высоты дерева к диаметру корневой шейки (31.90; 0.97), количество шишек (9; 4), количество семян (12; 5). Существует сильная положительная корреляция на уровне $p < 0,0001$ между диаметром и высотой, сильная положительная корреляция между количеством шишек и количеством семян ($p < 0,001$), сильная положительная корреляция ($p < 0,05$) между высотой дерева и количеством шишек. В будущем планируется оценить взаимосвязь накопленных градусо-дней, накопленных осадков, нормализованного дифференцированного индекса вегетации с количеством шишек и семян.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., восстановление лесных ландшафтов, качество, шишки, семена, корреляционный анализ

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00102, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/>.

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Новикова Т. П. Оценка качества лесосеменного материала на экспериментальном участке сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) при адаптивном восстановлении лесных ландшафтов / Т. П. Новикова // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 112–128. – Библиогр.: с. 123–127 (33 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8>.

Поступила 20.02.2023. Пересмотрена 29.03.2023. Принята 30.03.2023. Опубликована онлайн 15.05.2023.

Article

Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes

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

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

Abstract

When choosing a technology for restoring forest landscapes, the quality of forest seed material is a significant factor. To develop a reference information system to support decision-making for adaptive restoration of forest landscapes, it is necessary to have data on the types and quality of forest seed material. Existing studies directly or indirectly confirm, on the one hand, the influence of seed quality on the quality of future plantations, on the other hand, the influence of forest characteristics on the quality and quantity of seeds. Preservation of the quality of forest seed material in conditions of large-scale harvesting of Scots pine seeds (*Pinus sylvestris* L.) is possible with the development of permanent forest seed plots, and (or) the use of modern technologies for separating forest seeds without loss of genetic diversity and increasing not only germination and seed germination energy, but also the vitality of seedlings, their stability to the change of abiotic factors. Descriptive statistics of biometric parameters of trees and cones of Scots pine on the experimental site (N51°50.00'; E39°22.09', 113 m ASL) demonstrates the following values (average; average error): the height of the tree (186.2; 11.7), the diameter of the root neck of the tree (5.9; 0.3), the ratio of the height of the tree to the diameter of the root neck (31.90; 0.97), the number of cones (9; 4), the number of seeds (12; 5). There is a strong positive correlation at the level of $p < 0.0001$ between diameter and height, a strong positive correlation between the number of cones and the number of seeds ($p < 0.001$), a strong positive correlation ($p < 0.05$) between the height of the tree and the number of cones. In the future, it is planned to evaluate the relationship of accumulated degree days, accumulated precipitation, normalized difference vegetation index with the cones and seeds number.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., forest landscapes restoration, quality, cones, seeds, correlation analysis

Funding: this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-26-00102, <https://rscf.ru/project/23-26-00102/>.

Acknowledgments: the author thanks the reviewers of their contribution to the expert evaluation of the article.

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

For citation: Novikova T.P. (2023). Assessment of the forest seed material quality at the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) experimental site during adaptive restoration of forest landscapes. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 112-128 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/8>.

Received 20.02.2023. *Revised* 29.03.2022. *Accepted* 30.03.2023. *Published online* 15.05.2023.

Введение

Площадь насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в России¹⁷ составляет 1181 тыс. км², относится к основным лесобразующим породам [1], распространена в «широкой климатической нише» [2]. Ключом к успешному управлению этими насаждениями является правильное понимание процессов роста [3] лесных культур и повышение качества лесосеменного материала [4].

В результате научных исследований в области экологии и лесоводства были выявлены факторы, влияющие на вариации роста деревьев. Среди этих факторов наиболее важными являются физиология, видовые, возрастные и генетические характеристики [3] лесных культур. Важными внешними факторами являются климатические условия, уклон почвы, тип конкуренции и близлежащие деревья [6], природные нарушения и методы лесохозяйственной рубки [5]. То есть, научно доказано влияние биотических и абиотических факторов на рост и продуктивность лесных насаждений [8]. Параллельно существуют исследования, показывающие влияние физиологического и генетического качества семян на адаптацию к абиотическим факторам, жизнеспособность, устойчивость и сохранность будущих насаждений [7].

Заготовка шишек и семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), как правило, происходит без учета генетического разнообразия. Доказано, что генетическое разнообразие зависит от «индивидуальных особенностей участвующих в формировании урожая родительских деревьев» [28]. Главным критерием заготовки шишек и семян выступает количественный фактор – «как можно больше объем семян с наименьшими затратами (времени и труда)» [7]. Упрощенная схема последовательности технологических операций подготовки лесосеменного материала хвойных пород представлена в ранней работе автора [25].

Безусловно, научное сообщество ученых в области генетики, биологии, тестирования и авто-

матизированной подготовки семян перед посевом отмечает важность и необходимость генетического разнообразия [9-11] и повышения качества лесосеменного материала [12-14], но на практике заготовка шишек проводится по «сплошному» принципу без учета сначала особенностей насаждения, а затем, и особенностей шишек. В результате лесосеменной ворох обладает в качестве характеристик лишь годом и местом сбора. В дальнейшем, исходя из всхожести и энергии прорастания, семенам присваивается класс качества [10] без учета генетических особенностей. В условиях масштабной заготовки семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) одним из вариантов сохранения и развития генетического разнообразия видится в «развитие и эффективное использование постоянных лесосеменных участков (ПЛСУ)» [15,16]. Другим вариантом может быть применение современных технологий сепарирования лесных семян [17-19] без потери генетического разнообразия [20,21] и повышения не только всхожести и энергии прорастания семян [22], но и виталитета [23] сеянцев, их устойчивости к изменению абиотических факторов.

Для реализации целей восстановления лесных ландшафтов при выборе лесосеменного материала необходимо исходить из выбранной технологии лесовосстановления [24]. С учетом большого количества возможных вариаций совокупностей технологических операций [26] при различных технологиях восстановления лесных ландшафтов, базирующихся, например, на применении сеянцев с ЗКС [23], посева семян, посева с БПЛА [27] и т.д., необходимо учитывать не только всхожесть и энергию прорастания семян, но и жизнеспособность (при длительном хранении или необходимости сохранения состояния покоя при неблагоприятных условиях), количественные параметры семян (точные системы высева семян чувствительны к размерным характеристикам), генетические характеристики (сохранение генетического разнообразия влияет на качество и состояние искусственно восстановленных лесных ландшафтов). Таким образом, каждая технология восстановления лесных ландшафтов, отличающаяся набором технологических операций, а также целью и задачами конечно-

¹⁷ Сосновые леса: Большая Российская Энциклопедия. Дата публикации: 23 августа 2022 г. в 19:54 (GMT+3) [Электронный ресурс]. URL : <https://bigenc.ru/c/sosnovye-lesa-8e3276> (дата обращения 27.02.2023).

го результата, требует подготовки для каждого варианта своего лесосеменного материала.

Под восстановлением лесных ландшафтов понимаем следующие процессы – искусственное лесовосстановление, лесоразведение, содействие естественному лесовозобновлению, т.е. все возможные процессы, направленные на приращение площадей, занятых лесными ландшафтами. С биологической точки зрения это разные процессы, но с технической и математической сторон, если в качестве входных переменных учесть: расположение участка (широту и долготу); высоту над уровнем моря; уклон; тип почв; влияние антропогенных факторов на состояние участка: задернение, гари, вырубки и, как следствие, необходимость очистки; количество пней [31] и т.п.; температура; влажность и другие значимые характеристики, то изменяя переменные в «формуле», описывающей восстановление лесных ландшафтов и следуя алгоритму лесовосстановления [25, 26], для достижения цели максимального увеличения площадей лесных насаждений с минимальными затратами (при выборе оптимальной технологии восстановления, как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе), можно не акцентировать внимание на особенностях биогеоценозов для различных вариантов восстановления лесных ландшафтов и объединить три понятия – искусственное лесовосстановление, лесоразведение, содействие естественному лесовозобновлению.

Важно, что для разработки справочной информационной системы для адаптивного восстановления лесных ландшафтов (FLR-Library) необходимо не только исследование международной терминологии лесного хозяйства (в том числе и понятие восстановление лесных ландшафтов), но и в рамках системы обеспечить поддержку принятия управленческих решений для адаптивного восстановления лесных ландшафтов. Поддержка и принятие управленческих решений невозможно без сбора данных об объекте исследования, анализе этих данных, моделировании процессов, разработки алгоритмов. Поэтому для разработки такой системы поддержки принятия решений для адаптивного восстановления лесных ландшафтов необходимо

собрать данные о видах и качестве лесосеменного материала; способах восстановления; технологических операциях; машинах и механизмах, обеспечивающих определенные этапы технологических операций.

Цель данного исследования – изучить и проанализировать возможные зависимости между биометрическими параметрами дерева сосны обыкновенной и количеством шишек, и семян в них, а также массой и размерами шишек для оценки качества лесосеменного материала на экспериментальном участке.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Образцы зрелых шишек отбирали на экспериментальном участке (координаты узловой точки – N51°50.00'; E39°22.09', 113 м НУМ) с культур сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.), созданных посадкой контейнерных сеянцев по дну борозды, после пирогенного воздействия, в природно-производственных условиях произрастания Учебно-опытного лесхоза ВГЛТУ. Возраст насаждения – 11 лет.

Климатические условия (накопленные градусо-дни и накопленные осадки в мм), а также нормированный индекс вегетации (NDVI), относящиеся к участку проведения исследований, представлены на рис. 1-3.

Сбор данных

Оценивали показатели репродукции урожая шишек 2022–2023 годов сбора способом сплошного перечета шишек (впервые способ предложен проф. В.Д. Огиевским), на примере 20 деревьев, в двукратной повторности. Проанализировали 188 шишек.

Анализ проводился по следующим признакам семенной продуктивности: полнозернистость семян и число семян в шишке. «На популяционном уровне данные признаки участвуют в адапционных процессах, имеют разный порог чувствительности к засухе, отражают разные этапы формирования семян» [29].

Природопользование

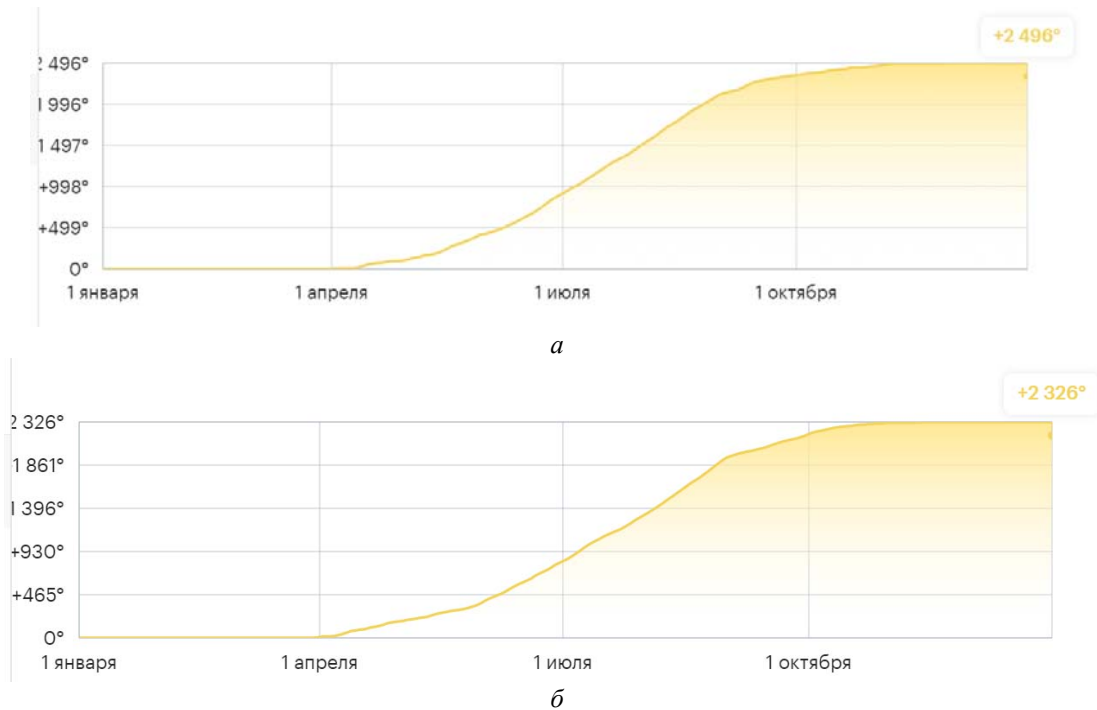


Рисунок 1. Эффективная накопленная температура (в градусо-днях) вегетационных периодов сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) 2021 (а) и 2022 (б) годов на участке, используемом в исследовании
Figure 1. The effective accumulated temperature (in degree-days) of the growing periods of Scots pine (*P. sylvestris* L.) in 2021 (a) and 2022 (b) at the site used in the study

Источник: <https://app.onesoil.ai/>

Source: <https://app.onesoil.ai/>

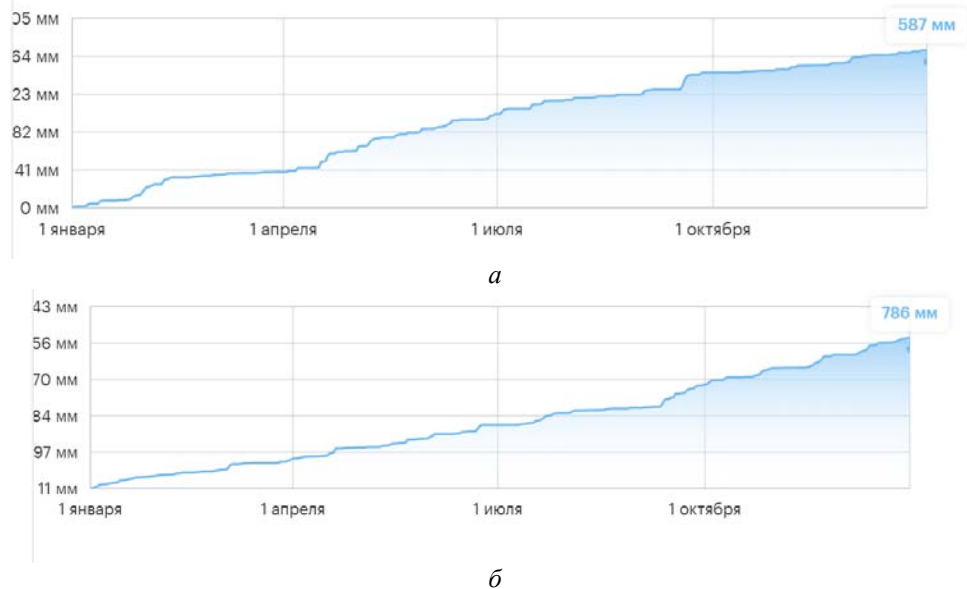


Рисунок 2. Накопленные осадки (в мм) вегетационных периодов сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) 2021 (а) и 2022 (б) годов на участке, используемом в исследовании
Figure 2. Accumulated precipitation (in mm) of the growing seasons of Scots pine (*P. sylvestris* L.) in 2021 (a) and 2022 (b) years on the site used in the study

Источник: <https://app.onesoil.ai/>

Source: <https://app.onesoil.ai/>

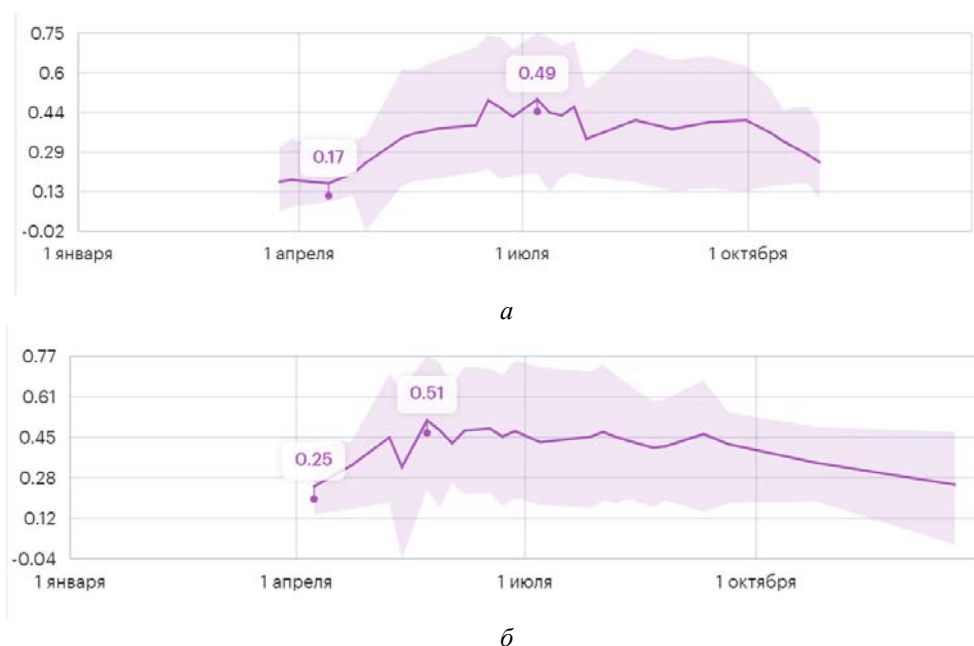


Рисунок 3. NDVI-индекс вегетационных периодов сосны обыкновенной (*P. Sylvestris* L.) 2021 (а) и 2022 (б) годов на участке, используемом в исследовании

Figure 3. Normalized difference vegetation index of Scots pine (*P. sylvestris* L.) in 2021 (а) and 2022 (б) years on the site used in the study

Источник: <https://app.onesoil.ai/>

Source: <https://app.onesoil.ai/>

Высоту молодого дерева (Н) измеряли с помощью рулетки с градуировкой в миллиметрах (точность 1 мм), при этом стандартом измерения служило расстояние между корневой шейкой и апикальной точкой самого высоко расположенного листа (хвои). Диаметр ствола (D) определяли на уровне корневой шейки с помощью мерной ленты (точность 1 мм), измеряя длину окружности (L) и приводя ее к диаметру соотношением $D = L/\pi$. Далее рассчитывали отношение высоты Н к диаметру D (HDR).

Отобранные с каждого измеренного дерева шишки (при их наличии) были упакованы в полиэтиленовые пакеты и транспортированы в исследовательскую лабораторию на базе ВГЛТУ. Конусы шишек были закрыты во время сбора. В лаборатории шишки взвешивали с помощью цифровых весов (точность 0,001 г) и измеряли штангенциркулем (точность 0,01 мм) длину конуса, диаметр конуса в самой широкой части в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Анализ данных

Данные массы шишки, длины конуса шишки, диаметра шишки, массы семян в шишке после проверки необходимых условий по распределению

вариант (рис. 4) анализировали с помощью одно-стороннего дисперсионного анализа Nested 1way ANOVA с использованием платформы для визуализации статистических данных GraphPad Prism, версия 8.4.3 (GraphPad Software LLC).

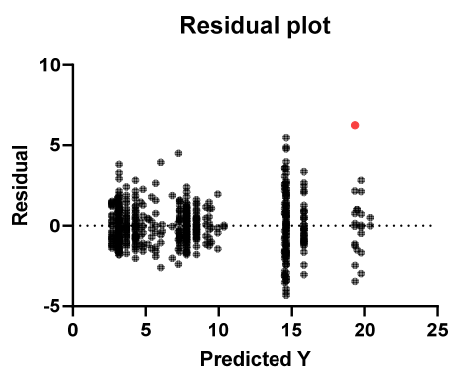
Графики остатков (рис. 4) – Residual Plot (рис. 4, а), Homoscedasticity plot (рис. 4, б), QQ plot (рис. 4, в) – построенные на основании необработанных, не усредненных, данных представленных выше четырех параметров, демонстрируют достаточное соответствие прогнозируемым значениям (рис. 4, а и б) и нормальному распределению (рис. 4, в).

Residual Plot (рис. 4, а), абсциссы которого представляют прогнозируемые (predicted) значения, а ординаты – остатки (residuals), представляющие собой разницу между наблюдаемыми (observed) и прогнозируемыми (predicted) значениями параметров конуса шишки, демонстрирует достаточно хорошую сгруппированность возле ординат с однозначными значениями. Это, несмотря на имеющиеся редкие выбросы (красная точка), показывает достаточное соответствие прогнозируемых значений действительным и предопределяет высокую линей-

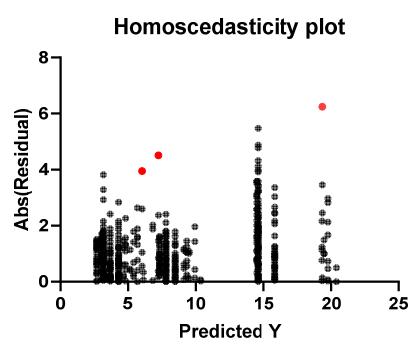
ную регрессионную взаимосвязь между параметрами.

Homoscedasticity plot (рис. 4, б), оценивающий постоянство дисперсии рассматриваемых параметров, предполагает, что, вероятно, существует небольшие выбросы по вертикальной оси, тем менее недостаточно оснований предполагать гетероскедатичность и влияние дополнительных предикторов на прогнозируемые значения.

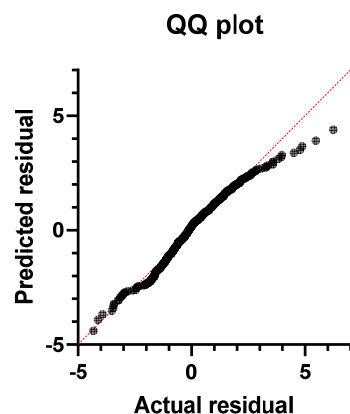
На QQ Plot (рис. 4, в) точки немного отклоняются от диагональной линии на верхнем конце хвоста, однако в целом точки попадают на диагональную линию довольно хорошо. Это говорит о том, что предположение о нормальности распределения вариант указанных параметров, вероятно, выполнено.



а



б



в

Рисунок 4. Анализ прогнозируемых значений (а), гомоскедатичности (б) и нормальности (в) распределения исследуемых параметров конуса шишек сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.)

Figure 4. Analysis of the predicted values (a), homoscedasticity (b) and normality (c) of the distribution of the studied parameters of the cone cones of the common pine (*P. sylvestris* L.)

Источник: собственная композиция автора.

Source: the author's own composition.

Корреляции Пирсона (Гауссово распределение вариант) использовали для определения вида взаимосвязи между массой шишки после сбора, длины конуса шишки, диаметра шишки, массы семян в шишке после раскрытия. Ранговые корреляции Спирмена использовали для определения зависимости между высотой дерева Н, с которого отбирали шишки, отношением высоты к диаметру HDR, количеством шишек с дерева, количеством семян с дерева. Визуализацию корреляционных матриц производили с помощью графика «Heat map» с использованием платформы для визуализации статистических данных GraphPad Prism, версия 8.4.3 (GraphPad Software LLC).

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены результаты статистической обработки данных параметров деревьев, количества шишек и семян, которые легли в основу дальнейшего анализа.

На рис. 5 представлено распределение параметров деревьев и числа отобранных с них шишек и извлеченных семян за 2022 и 2023 годы.

На рис. 6 представлено распределение параметров шишек на опытном участке в зависимости от высоты дерева в 2022 (а) и 2023 (б) годах. Необходимо отметить, что в 2022 году было собрано 162 шишки, а в 2023 – 26 штук. Цифрами через черточку представлена кодировка отдельных деревьев. Необходимо отметить, что на графиках представлены только те деревья, которые в изучаемом году имели шишки.

На рис. 7 представлены корреляционные матрицы взаимосвязи параметров дерева (высоты, диаметра и коэффициента выносливости), количества шишек и семян друг с другом (а) и между годами измерений (б).

На рис. 8 представлены корреляционные матрицы взаимосвязи параметров шишек между деревьями в 2022 (а) и 2023 (б) годах.

В результате эксперимента по сбору шишек и анализу их формы и количества семян были получены некоторые интересные результаты: попадались несимметричные шишки, а в визуально зрелых шишках наблюдалось отсутствие семян. Все это представляет интерес для дальнейшего изучения.

С точки зрения технологического процесса, например последующей сушки конусов шишек, ассиметричные образцы необходимо элиминировать до их загрузки в шишкосушилки, чтобы исключить энергетические потери. Следовательно, алгоритм выбора технологической операции сушки конусов шишек необходимо дополнить условием ассиметричности, технически реализуемым с помощью оптических устройств в видимом диапазоне спектра.

Таблица 1

Дескриптивная статистика измерений биометрических параметров культур сосны обыкновенной и подсчета числа шишек и семян
Descriptive statistics of measurements of biometric parameters of scots pine crops and counting the number of cones and seeds

Years	2022					2023				
	H, cm	D, cm	HDR	CN	SN	H, cm	D, cm	HDR	CN	SN
Minimum	80,0	2,9	25,7	0	0	86,0	3,5	24,5	0	0
25% Percentile	163,5	4,2	29,1	0	0	169	4,9	28,7	0	0
Median	187,0	6,5	31,3	0	0	215	7,0	31,4	0	0
75% Percentile	224,0	7,0	33,8	7	21	264	8,3	34,0	1	0
Maximum	260,0	8,0	41,4	78	68	296	9,6	41,4	11	54
Range	180,0	5,1	15,7	78	68	210	6,1	16,9	11	54
Mean	186,2	5,9	31,90	9	12	213	6,7	31,7	2	3
Std. Deviation	48,0	1,5	4,00	20	21	59,7	1,8	4,58	3	13
Std. Error of Mean	11,7	0,3	0,97	4	5	14,5	0,4	1,11	1	3
Coefficient of variation	25,80%	25,9%	12,5%	21,4%	17,5%	28,0%	26,9%	14,4%	22,1%	39%
Skewness	-0,6325	-0,596	0,797	2,82	1,98	-0,489	-0,233	0,598	2,28	4,10
Kurtosis	0,09981	-0,983	0,637	8,34	3,15	-0,417	-1,14	0,330	4,25	16,9

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's own composition

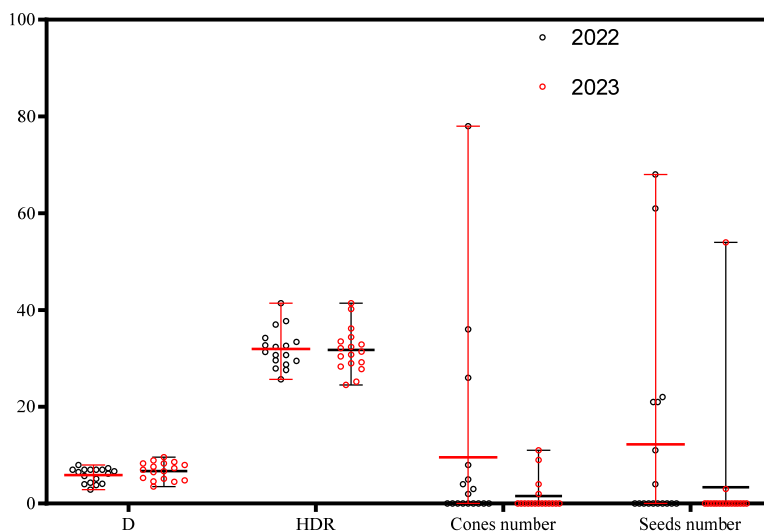
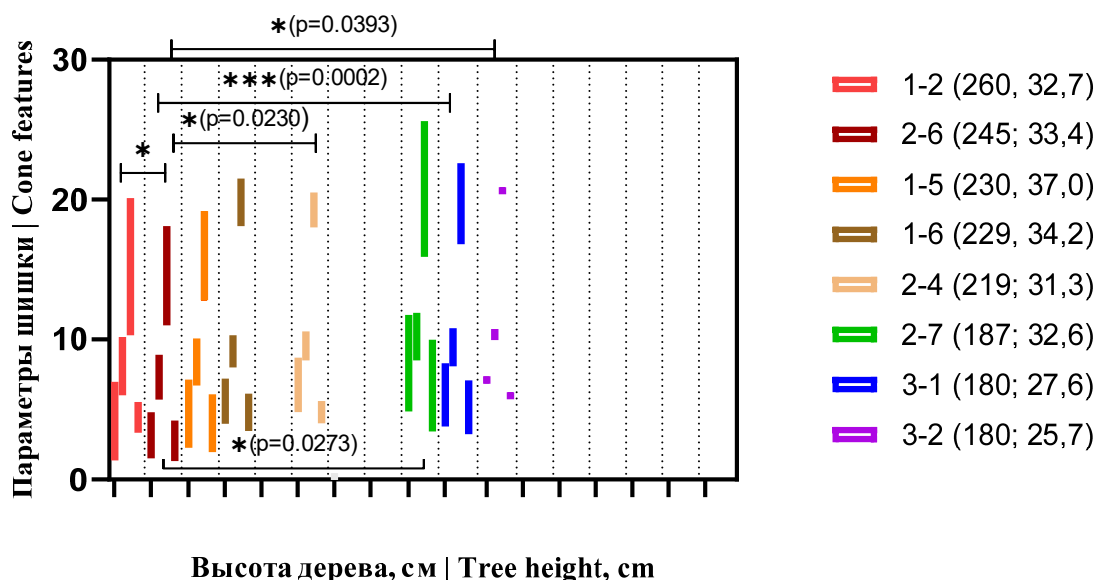


Рисунок 5. Распределение параметров деревьев и числа отобранных с них шишек и извлеченных семян. D – диаметр корневой шейки, HDR – отношение высоты дерева к диаметру корневой шейки, Cones number (CN) – количество шишек; Seeds number (SN) – количество семян. Утолщенная удлиненная горизонтальная линия в боксплоте есть среднее значение варианты, висеры отображают размах вариантов. Самая широкая часть боксплота есть наиболее вероятно встречаемое значение параметра для прогнозирования

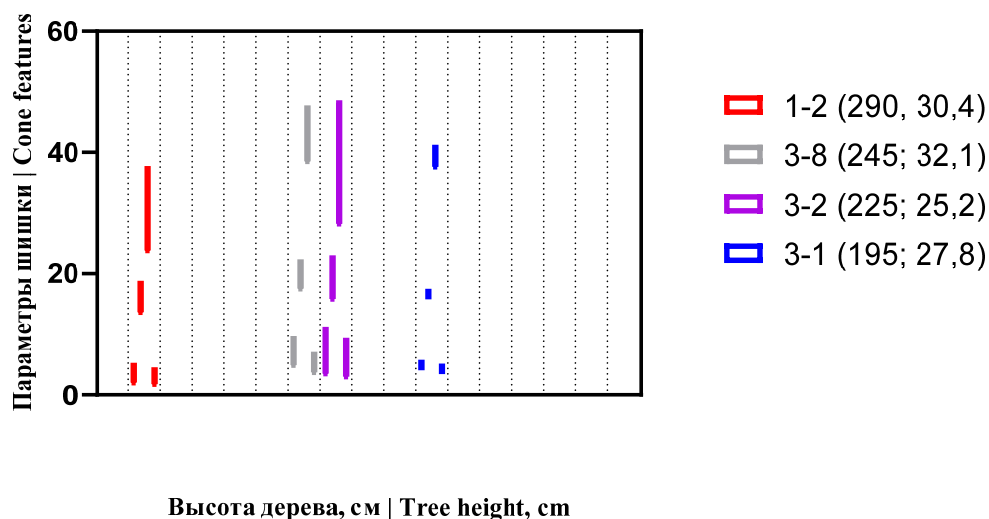
Figure 5. Distribution of tree parameters and the number of cones selected from them and seeds extracted. D is the diameter of the root neck, HDR is the ratio of the height of the tree to the diameter of the root collar. Thickened elongated horizontal line in the boxplot there is an average value of options, whiskers display the span of the option. The widest part of the boxplot is the most likely value of the parameter to predict

Источник: собственная композиция автора.

Source: the author's own composition.



a | a



a | b

Рисунок 6. Распределение параметров шишек на опытном участке в зависимости от высоты дерева в 2022 (а) и 2023 (б) годах. Высота дерева по оси абсцисс уменьшается от начала координат с 260 до 80 см. Внутри основных столбцов, разделенных точечными вертикальными линиями, расположены четыре плавающих цветных бара, соответствующие следующим параметрам шишек: масса шишки после сбора (в г), диаметр конуса шишки (в мм), длина конуса шишки (в мм), масса шишки после раскрытия (в г). Нижний и верхний уровень каждого бара соответствует минимальному и максимальному значению параметра. В скобках в легенде представлены значения высоты дерева в см и отношение высоты к диаметру возле корневой шейки. Параметры шишек на деревьях, отмеченных звездочками, статистически значимо различаются на уровне значимости p согласно пост-хок Dunn's тесту сравнения средних

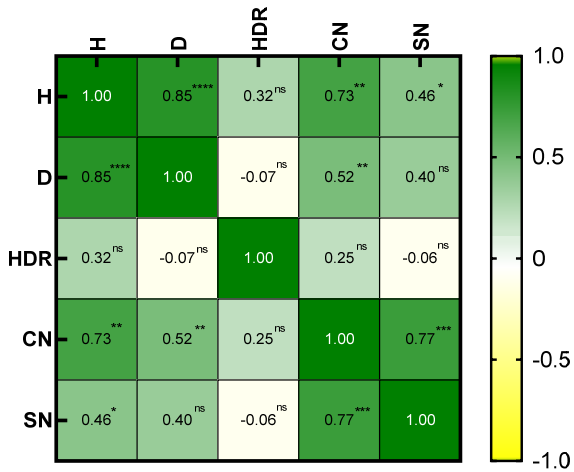
Figure 6. Distribution of the parameters of cones on the experimental site depending on the height of the tree in 2022. The height of the tree along the abscissa axis decreases from the origin from 260 to 80 cm. Inside the main columns, separated by dotted vertical lines, there are four floating-colored bars corresponding to the following parameters of cones: the mass of the cone after collection (g), the diameter of the cone cone (mm), the length of the cone cone (mm), the mass of the cone after disclosure (g). The lower and upper level of each bar corresponds to the minimum and maximum the value of the parameter. In brackets in the legend are the values of the height of the tree in cm and the ratio of height to diameter near the root collar. The parameters of the cones on the trees marked with asterisks differ statistically significantly at the significance level p according to the post-hawk Dunn's mean comparison test

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

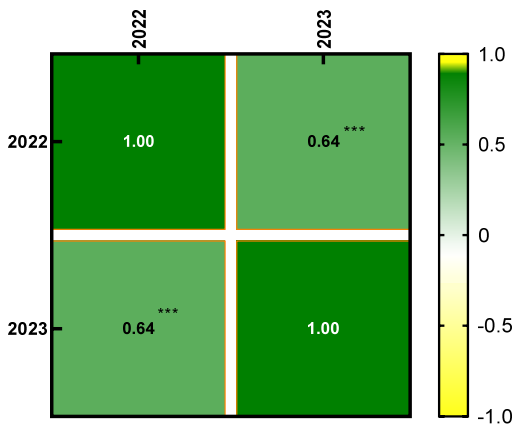
«Семязачатки погибают при неопылении, образуя отделяемые и неотделяемые крылатки в зрелых шишках» [30]. Для сокращения трудозатрат и энергозатрат при сборе шишек сосны обыкновенной важным видится изучение параметров и визуальных особенностей зрелых шишек без семян.

Отношение длины конуса к диаметру, как правило, характеризует продолговатую (св. 2,5 до 3,0), широкую (св. 2,0 до 2,5), яйцевидную (свыше 1,5 до 2,0), круглую (свыше 1,0 до 1,5) формы шишек.

Результаты корреляционного анализа показали значимую корреляцию на уровне $p < 0,0001$ между диаметром и высотой, положительную корреляцию между количеством шишек и количеством семян $p < 0,001$, также наблюдается положительная корреляция $p < 0,05$ между высотой и количеством шишек, что подтверждается научными исследованиями [32, 33].



a | a



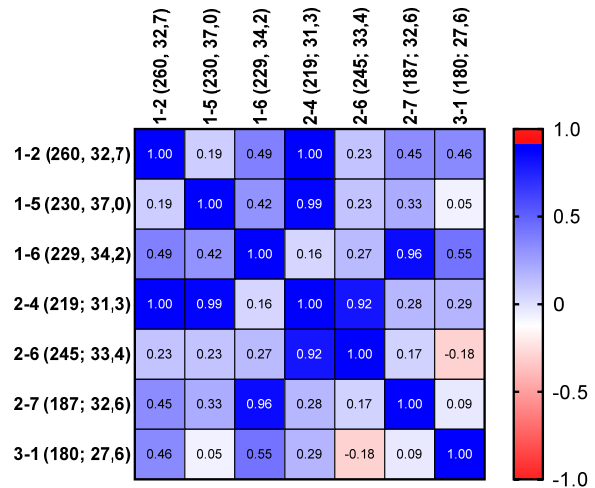
b | b

Рисунок 7. Корреляционная матрица взаимосвязи параметров дерева (высоты, диаметра и коэффициента выносливости), количества шишек и семян друг с другом (а) и между годами измерений (б). Звездочками обозначен уровень значимости p: четыре звездочки (p < 0,0001); три звездочки (p < 0,001); две звездочки (p < 0,05); одна звездочка (p < 0,01); ns – not significant (не значимо).

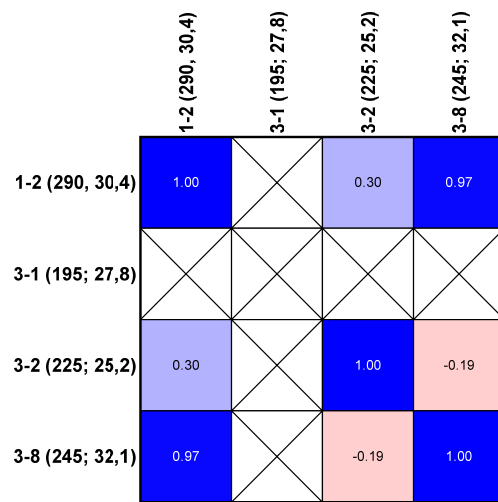
Figure 7. Correlation matrix of the relationship of the parameters of the tree (height, diameter and coefficient of endurance), the number of cones and seeds with each other (a) and between the years of measurements (b). Asterisks indicate the significance level p: four asterisk (p < 0.0001); three asterisks (p < 0.001); two asterisks (p < 0.05); one asterisk (p < 0.01); ns – not significant (not significant).

Источник: собственная композиция автора.

Source: the author's own composition.



a | a



b | b

Рисунок 8. Корреляционная матрица взаимосвязи параметров шишек между деревьями в 2022 (а) и 2023 (б) годах. В скобках в легенде представлены значения высоты дерева в см и отношение высоты к диаметру возле корневой шейки

Figure 8. Correlation matrix of the relationship of the parameters of cones between trees in 2022 (a) and 2023 (b) years. In brackets in the legend are the values of the height of the tree in cm and the ratio of height to root collar diameter

Источник: собственная композиция автора.

Source: the author's own composition.

Заключение

1. Для управления процессом восстановления лесных ландшафтов и приращения площадей лесных насаждений с точки зрения выбора технических средств и алгоритма восстановления лесных ландшафтов целесообразно не акцентировать внимание на особенностях биогеоценозов для различных вариантов восстановления лесных ландшафтов и объединить три понятия – искусственное лесовосстановление, лесоразведение, содействие естественному лесовозобновлению.

2. Для разработки справочной информационной системы поддержки принятия решений для адаптивного восстановления лесных ландшафтов необходимо иметь данные о видах и качестве лесосеменного материала.

3. Сохранение качества лесосеменного материала в условиях масштабной заготовки семян сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) возможно при

развитии постоянных лесосеменных участков, и (либо) применении современных технологий сепарирования лесных семян без потери генетического разнообразия и повышении качества семян.

4. Изучены и проанализированы зависимости между биометрическими параметрами дерева сосны обыкновенной и количеством шишек ($p < 0,0001$), и семян в них, а также массой и размерами шишек ($p < 0,001$).

В дальнейшем планируется продолжить изучение деревьев, количества шишек снятых с них и семян для изучения корреляции между параметрами дерева и количеством шишек и семян. Также представляет интерес изучение влияния увеличения возраста деревьев на количество шишек и семян. Необходимо в будущем проанализировать влияние климатических условий на количество шишек и семян (не менее чем за 5 лет).

Список литературы

1. Дегтярева, С.И. Биология. Характеристика основных лесобразующих пород лиственных и хвойных формаций лесов / С. И. Дегтярева. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2018. – 87 с. – ISBN 978-5-7994-0266-2. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/vnkozt>.
2. Benito Garzón, M. Biogeographical patterns of local adaptation and plasticity of Mediterranean pines and their implications under climate change / M. Benito Garzón, N. Vizcaíno-Palomar // Pines and their mixed forest ecosystems in the Mediterranean basin. – 2021. – Vol. 38. – P. 71-82. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63625-8_4.
3. Vospernik, S. Tree species growth response to climate in mixtures of *Quercus robur*/*Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* across Europe – a dynamic, sensitive equilibrium / S. Vospernik, M. Heym, H. Pretzsch et al. // Forest Ecology and Management. – 2023. – Vol. 530. – Article 120753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120753>.
4. Экспресс-анализ семян в лесохозяйственном производстве: теоретические и технологические аспекты / А. И. Новиков, М. В. Драпалюк, С. В. Соколов, Т. П. Новикова. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – 176 с. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/hmrfvd>.
5. Zenner, E.K.; Teimouri, M. Modeling in forestry using mixture models fitted to grouped and ungrouped data. Forests. 2021; 12: 1196. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091196>
6. Barbosa, L.O.; Costa, E.A.; Schons, C.T.; Finger, C.A.G.; Liesenberg, V.; Bispo, P.d.C. Individual tree basal area increment models for Brazilian pine (*Araucaria augustifolia*) using artificial neural networks. Forests. 2022; 13: 1108. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13071108>
7. Nef D.P., Gotor E., Wiederkehr Guerra G., Zumwak J.M., Kettle C.J. Initial investment in diversity is the efficient thing to do for resilient forest landscape restoration. Front. For. Glob. Change. 2021; 3: 615682. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.615682>.
8. Оценка состояния и продуктивности высокополнотных сосновых насаждений подтаежно-лесостепного района Средней Сибири / А. А. Вайс, П. В. Михайлов, А. И. Мельник [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 3(47). – С. 26-41. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/3>.

9. Fremout, T. Diversity for Restoration (D4R): Guiding the selection of tree species and seed sources for climate-resilient restoration of tropical forest landscapes / T. Fremout, E. Thomas, H. Taedoumg et al. // Journal of Applied Ecology. – 2022. – Vol. 59. – № 3. – P. 664-679. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14079>.
10. Heuchel, A. Genetic diversity and background pollen contamination in Norway spruce and Scots pine seed orchard crops / A. Heuchel, D. Hall, W. Zhao et al. // Forestry Research. – 2022. – Vol. 2. – № 0. – P. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.48130/fr-2022-0008>.
11. Ivetić, V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić, A.I. Novikov // Forestry Engineering Journal. – 2019. – Vol. 9. – No. 2. – P. 56-65. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/hsenfb>.
12. Малышева, В. И. Показатели качества семян сосны обыкновенной в Воронежской области / В. И. Малышева // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений. – 2021. – Т. 24. – С. 65-68. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_47954016_71718118.pdf
13. How to increase the analog-to-digital converter speed in optoelectronic systems of the seed quality rapid analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamensky, A. I. Novikov, V. Ivetić // Inventions. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>.
14. Новиков, А. И. Экспресс-анализ лесных семян биофизическими методами : монография / А. И. Новиков. – Воронеж : Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2018. – 128 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/yzuzgx>.
15. Potasheva, Y.I. Genetic features of the offspring of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees differing in the abundance of fruiting / Y.I. Potasheva, D.H. Fayzulin, N.P. Gaevsky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 677. – № 5. – P. 052106. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052106>.
16. Tsarev, A.P. The current state of forest breeding in the Russian federation: the trend of recent decades / A.P. Tsarev, V.A. Tsarev, R.P. Tsareva, N. V. Laur // Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal). – 2021. – № 6. – P. 38-55. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-38-55>.
17. Bacherikov, I. V. Coat Colour Grading of the Scots Pine Seeds Collected from Faraway Provenances Reveals a Different Germination Effect / I. V Bacherikov, D.E. Raupova, A.S. Durova et al. // Seeds. – 2022. – Vol. 1. – № 1. – P. 49-73. DOI: <https://doi.org/10.3390/seeds1010006>.
18. Novikov, A.I. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / A.I. Novikov, S.V. Sokolov, M.V. Drapalyuk et al. // Forests. – 2019. – Vol. 10. – № 12. – Article 1064. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121064>.
19. Novikov, A.I. Grading of Scots pine seeds by the seed coat color: how to optimize the engineering parameters of the mobile optoelectronic device / A.I. Novikov, V.K. Zolnikov, T.P. Novikova // Inventions. – 2021. – Vol. 6. – № 1. – P. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions6010007>.
20. Li, X. Morphological and Comparative Transcriptome Analysis of Three Species of Five-Needle Pines: Insights into Phenotypic Evolution and Phylogeny / X. Li, K. Cai, Q. Zhao et al. // Frontiers in Plant Science. – 2022. – Vol. 13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.795631>.
21. Hall, D. Divergent pattern between phenotypic and genetic variation in Scots pine / D. Hall, J. Olsson, W. Zhao et al. // Plant Communications. – 2020. – № December. – P. 100139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2020.100139>.
22. Новиков, А. И. Влияние сортирования семян сосны обыкновенной по цвету и размерам на их грунтовую всхожесть в контейнерах / А. И. Новиков // Хвойные бореальной зоны. – 2019. – Т. 37, № 5. – С. 313-319. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/vskfod>.
23. Новикова, Т. П. Влияние климатического индекса градусо-дней на виталитет 3-летних сеянцев сосны обыкновенной из сортированных по спектрометрическим свойствам семян / Т. П. Новикова, В. И. Малышева, Е.П. Петрищев // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 1(45). – С. 110-118. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9>.
24. Патент № 2714705 С1 Российская Федерация, МПК А01G 23/00. Способ восстановления леса : № 2019115418 : заявл. 20.05.2019 : опубл. 19.02.2020 / А. И. Новиков ; заявитель Федеральное государственное

бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова". – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42483242>

25. Новикова, Т. П. Исследование набора технологических операций подготовки семенного материала хвойных пород для лесовосстановления // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11, № 4(44). – С. 150-160. – DOI <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/13>.

26. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // Inventions. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.

27. Novikov, A. I. Aerial seeding of forests in Russia: A selected literature analysis / A. I. Novikov, B. T. Ersson // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 226. P. 012051. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012051>.

28. Шейкина, О. В. Генетический полиморфизм и дифференциация семян сосны обыкновенной разных селекционных категорий по ISSR-маркерам / О. В. Шейкина, Т. Н. Криворотова, Ю. Ф. Гладков // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9, № 4(36). – С. 15-24. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.4/2>.

29. Кузнецова, Н. Ф. Развитие неспецифической и специфической реакций у *Pinus sylvestris* L. на популяционном уровне в стрессовом градиенте засушливых лет / Н. Ф. Кузнецова // Экология. – 2018. – № 5. – С. 332-338. – DOI <https://doi.org/10.7868/S0367059715050133>.

30. Кистерный, Г. А. Состояние женской генеративной сферы сосны обыкновенной в действующем очаге корневой губки (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) / Г. А. Кистерный // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 4(48). – С. 31-46. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/3>.

31. Эксплуатация почвообрабатывающих орудий в условиях нераскорчеванных вырубок европейской части России: анализ препятствий в виде пней и корней / С. В. Малюков, Е. В. Поздняков, С. И. Дегтярева [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 4(48). – С. 96-113. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/7>.

32. Çerçioğlu, M. Relationship among altitude, growth characteristics and cone production in Brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) / M. Çerçioğlu, D. Çetinkaya // Turkish Journal of Forestry | Türkiye Ormançılık Dergisi. – 2021. – P. 17-24. DOI: <https://doi.org/10.18182/tjf.834136>.

33. Maia, P. From cone to seed and seedling—characterization of three Portuguese *Pinus pinaster* Aiton populations / P. Maia, S. Corticeiro // Seeds. – 2022. – Vol. 1. – No. 2. – P. 126-135. DOI: <https://doi.org/10.3390/seeds1020011>.

References

1. Degtyareva, S.I. Biologiya. Harakteristika osnovnyh lesoobrazuyushchih porod listvennyh i hvojnyh formacij lesov [Biology. Characteristics of the main forest-forming species of deciduous and coniferous forest formations]. Voronezh : Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova, 2018. – pp. 87 (in Russian). ISBN 978-5-7994-0266-2. URL: <https://www.elibrary.ru/vnkozt>.

2. Benito Garzón, M. Biogeographical patterns of local adaptation and plasticity of Mediterranean pines and their implications under climate change / M. Benito Garzón, N. Vizcaíno-Palomar // Pines and their mixed forest ecosystems in the Mediterranean basin. – 2021. – Vol. 38. – P. 71-82. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63625-8_4.

3. Vospernik, S. Tree species growth response to climate in mixtures of *Quercus robur*/*Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* across Europe – a dynamic, sensitive equilibrium / S. Vospernik, M. Heym, H. Pretzsch et al. // Forest Ecology and Management. – 2023. – Vol. 530. – Article 120753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120753>.

4. Ekspress-analiz semyan v lesohozyajstvennom proizvodstve: teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty [Express analysis of seeds in forestry production: theoretical and technological aspects] / A. I. Novikov, M. V. Drapalyuk, S.V. Sokolov, T. P. Novikova. – Voronezh : Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova [Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov]. 2022: pp. 176 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/hmrfvd>.

5. Zenner, E.K.; Teimouri, M. Modeling in forestry using mixture models fitted to grouped and ungrouped data. *Forests*. 2021; 12: 1196. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12091196>.
6. Barbosa, L.O.; Costa, E.A.; Schons, C.T.; Finger, C.A.G.; Liesenberg, V.; Bispo, P.d.C. Individual Tree Basal Area Increment Models for Brazilian Pine (*Araucaria augustifolia*) Using Artificial Neural Networks. *Forests* 2022,13,1108. <https://doi.org/103390/f13071108>
7. Nef D.P., Gotor E., Wiederkehr Guerra G., Zumwak J.M., Kettle C.J. Initial investment in diversity is the efficient thing to do for resilient forest landscape restoration. *Front. For. Glob. Change*. 2021; 3: 615682. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.615682>.
8. Vays, A. Assessment of the condition and productivity of high pine plantations in the subtaiga forest-steppe region of central Siberia / A. Vays, P. Mihaylov, A. Melnik et al. // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – No. 3. – P. 26-41 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/3>.
9. Fremout, T. Diversity for Restoration (D4R): Guiding the selection of tree species and seed sources for climate-resilient restoration of tropical forest landscapes / T. Fremout, E. Thomas, H. Taedoung et al. // *Journal of Applied Ecology*. – 2022. – Vol. 59. – № 3. – P. 664-679. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14079>.
10. Heuchel, A. Genetic diversity and background pollen contamination in Norway spruce and Scots pine seed orchard crops / A. Heuchel, D. Hall, W. Zhao et al. // *Forestry Research*. – 2022. – Vol. 2. – № 0. – P. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.48130/fr-2022-0008>.
11. Ivetić, V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić, A.I. Novikov // *Forestry Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 9. – No. 2. – P. 56-65. – Режимдоступа: <https://www.elibrary.ru/hsenfb>.
12. Malysheva, V. I. Pokazateli kachestva semyan sosny obyknovenoj v Voronezhskoj oblasti [Indicators of the quality of common pine seeds in the Voronezh region] // *Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukcija drevesnyh rastenij* [Fruit growing, seed production, introduction of woody plants]. – 2021. – T. 24. – С. 65-68 (in Russian). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_47954016_71718118.pdf
13. How to increase the analog-to-digital converter speed in optoelectronic systems of the seed quality rapid analyzer / S. V. Sokolov, V. V. Kamensky, A. I. Novikov, V. Ivetić // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4, No. 4. – P. 61. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions4040061>.
14. Novikov, A. I. Ekspress-analiz lesnyh semyan biofizicheskimi metodami [Express analysis of forest seeds by biophysical methods]. Voronezh : Voronezhskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet im. G.F. Morozova [Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov], 2018. pp. 128. URL: <https://www.elibrary.ru/yzuzgx>.
15. Potasheva, Y.I. Genetic features of the offspring of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees differing in the abundance of fruiting / Y.I. Potasheva, D.H. Fayzulin, N.P. Gaevsky // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 677. – № 5. – P. 052106. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052106>.
16. Tsarev, A.P. The current state of forest breeding in the Russian federation: the trend of recent decades / A.P. Tsarev, V.A. Tsarev, R.P. Tsareva, N. V. Laur // *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*. 2021. No. 6. P. 38-55 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-38-55>.
17. Bacherikov, I. V. Coat Colour Grading of the Scots Pine Seeds Collected from Faraway Provenances Reveals a Different Germination Effect / I. V Bacherikov, D.E. Raupova, A.S. Durova et al. // *Seeds*. – 2022. – Vol. 1. – № 1. – P. 49-73. DOI: <https://doi.org/10.3390/seeds1010006>.
18. Novikov, A.I. Performance of Scots pine seedlings from seeds graded by colour / A.I. Novikov, S.V. Sokolov, M.V. Drapalyuk et al. // *Forests*. – 2019. – Vol. 10. – № 12. – P. 1064. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121064>.
19. Novikov, A.I. Grading of Scots pine seeds by the seed coat color: how to optimize the engineering parameters of the mobile optoelectronic device / A.I. Novikov, V.K. Zolnikov, T.P. Novikova // *Inventions*. – 2021. – Vol. 6. – № 1. – P. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions6010007>.
20. Li, X. Morphological and Comparative Transcriptome Analysis of Three Species of Five-Needle Pines: Insights into Phenotypic Evolution and Phylogeny / X. Li, K. Cai, Q. Zhao et al. // *Frontiers in Plant Science*. – 2022. – Vol. 13. – № February. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.795631>.

21. Hall, D. Divergent pattern between phenotypic and genetic variation in Scots pine / D. Hall, J. Olsson, W. Zhao et al. // *Plant Communications*. – 2020. – № December. – P. 100139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2020.100139>.
22. Novikov, A. I. Vliyanie sortirovaniya semyan sosny obyknovnoy po cvetu i razmeram na ih gruntovuyu vskhozhest' v kontejnerah [The influence of sorting of common pine seeds by color and size on their soil germination in containers] // *Hvoynye boreal'noj zony* [Coniferous boreal zones]. 2019. Vol. 37, no. 5. P. 313-319 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/vskfod>.
23. Novikova, T. The influence of the climatic index of degree-days on the vitality of 3-year-old seedlings of Scots pine from seeds graded by spectrometric features / T. Novikova, V. Malysheva, E. Petrishchev // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 110-118 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/9>.
24. Patent № 2714705 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK A01G 23/00. Sposob vosstanovleniya lesa : № 2019115418 : zayavl. 20.05.2019 : opubl. 19.02.2020 / A. I. Novikov ; zayavitel' Federal'noe gosudarstven-noe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Voronezhskij gosudarstvennyj lesno-tekhnicheskij universitet imeni G.F. Morozova" (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42483242>.
25. Novikova, T. Study of a set of technological operations for the preparation of coniferous seed material for reforestation // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 11. – No. 4. – P. 150-160 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/13>.
26. Novikova, T. P. The choice of a set of operations for forest landscape restoration technology / T. P. Novikova // *Inventions*. – 2022. – Vol. 7, No. 1. – DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions7010001>.
27. Novikov, A. I. Aerial seeding of forests in Russia: A selected literature analysis / A. I. Novikov, B. T. Ersson // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 226. P. 012051. – DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012051>.
28. Sheikina, O. Genetic polymorphism and seed differentiation Scots pine seeds of different selection categories using ISSR-markers / O. Sheikina, T. Krivorotova, Y. Gladkov // *Forestry Engineering Journal*. 2020. Vol. 9. No. 4. P. 15-24. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.4/2>.
29. Kuznecova, N. F. Razvitie nespecificheskoj i specificheskoj reakcij u *Pinus sylvestris* L. na po-pulyacionnom urovne v stressovom gradiente zasushlivyh let / N. F. Kuznecova // *Ekologiya*. 2018. № 5. P. 332-338 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367059715050133>.
30. Kisternyy, G. The state of the female generative sphere of Scots pine in the active focus of the root fungus (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref.) / G. Kisternyy // *Forestry Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 12. – № 4. – P. 31-46 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/3>.
31. Çerçioğlu, M. Relationship among altitude, growth characteristics and cone production in Brutian pine (*Pinus brutia* Ten.) / M. Çerçioğlu, D. Çetinkaya // *Turkish Journal of Forestry | Türkiye Ormançılık Dergisi*. – 2021. – P. 17-24 (in Turkish). DOI: <https://doi.org/10.18182/tjf.834136>.
32. Malyukov S.V., Pozdnyakov E.V., Degtyareva S.I., Shavkov M.V., Malyukova M.A., Shanin I.I., Ariko S.E. (2022) Operation of soil-cultivating implements in conditions of non-uprooted clearings in the european part of Russia: analysis of obstacles in the form of stumps and roots. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 12, No. 4 (48), pp. 96-113 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/7>.
33. Maia, P. From cone to seed and seedling—characterization of three Portuguese *Pinus pinaster* Aiton populations / P. Maia, S. Corticeiro // *Seeds*. – 2022. – Vol. 1. – No. 2. – P. 126-135. DOI: <https://doi.org/10.3390/seeds1020011>.

Природопользование

Сведения об авторе

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

Information about the author

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

✉ Для контактов/Corresponding author


Обзор

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/9>

УДК 630*228.6



Разновозрастность сосновых древостоев как фактор гармонизации системы лесохозяйственных мероприятий в ленточных борах Алтайского края

Алексей Е. Осипенко ✉, osipenkoae@m.usfeu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6148-1747>

Сергей В. Залесов, zalesovsv@m.usfeu.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Россия

Определено соотношение одновозрастных и разновозрастных сосняков в различных типах леса ленточных боров Алтайского края, а также закономерности формирования естественных сосновых насаждений. Данный вопрос важен для гармонизации всего комплекса лесохозяйственных мероприятий района исследований. Исследования основаны на анализе электронной базы данных, включающей сведения о лесном фонде 11 лесничеств Алтайского края (более 268 тысяч таксационных выделов общей площадью 1014 тыс. га). При помощи запросов с применением фильтров и сводных таблиц получена выборка естественных насаждений с преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Для каждого насаждения в выборке определено количество возрастных поколений и распределение площади одно- и разновозрастных сосняков по лесничествам, типам леса, классам бонитета. Статистическая обработка данных включала в себя кластерный анализ и применение критерия хи-квадрат. Сосняки естественного происхождения в районе исследований состоят преимущественно из 2-3 поколений сосны. На долю разновозрастных древостоев приходится 79,6 % площади. Одновозрастные сосняки занимают 20,4 % площади. При переходе от сырых к очень сухим условиям произрастания доля разновозрастных сосняков увеличивается. В будущем планируется доработать существующие системы рубок ухода в спелых, перестойных насаждениях в Алтае-Новосибирском лесорастительном районе лесостепей и ленточных боров с учетом соотношения одновозрастных и разновозрастных сосняков. Совершенствование системы лесохозяйственных мероприятий должно вестись на лесотипологической основе в сочетании с делением насаждений на высоко- и низкобонитетные.

Ключевые слова: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), возрастное поколение, разновозрастный древостой, ленточный бор, тип леса, класс бонитета, площадь

Финансирование: работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-293.2022.5.

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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Осипенко А. Е. Разновозрастность сосновых древостоев как фактор гармонизации системы лесохозяйственных мероприятий в ленточных борах Алтайского края / А. Е. Осипенко, С. В. Залесов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 129–145. – Библиогр.: с. 140–145 (41 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/9>.

Поступила 15.03.2023. Пересмотрена 23.03.2023 Принята 24.03.2023 Опубликована онлайн 15.05.2023

Review

Age differences of pine stands as a factor of harmonization of the system of forest management activities in ribbon forests of the Altai Krai

Aleksey E. Osipenko✉, osipenkoae@m.usfeu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6148-1747>

Sergey V. Zalesov, zalesovsv@m.usfeu.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

Abstract

The ratio of the same- and uneven-aged pine forests in various types of ribbon forests in Altai Krai, as well as the patterns of forming natural pine plantations, is determined. This issue is important for the harmonization of the entire set of forest management activities in the study area. The research is based on the analysis of an electronic database that contains information on the forest fund of 11 forest districts in Altai Krai (more than 268 thousand stratum with a total area of 1014 thousand ha). With the help of queries using filters and summary tables, a sample of natural plantations with a predominance of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) was obtained. For each plantation in the sample, the number of age generations and the distributions of the area of the same- and uneven-aged pine forests by forest districts, forest types, and quality classes were determined. Statistical data processing included cluster analysis and chi-squared test. Pine forests of natural origin in the study area consist mainly of 2-3 pine generations. The share of uneven-aged forest stands accounts for 79.6% of the area. Same-aged pine forests occupy 20.4% of the area. During the transition from damp to very dry growing conditions, the proportion of uneven-aged pine forests increases. In the future it is planned to improve the existing systems of improvement thinning in mature, declining stands of forest-steppes and ribbon forests in the Altai-Novosibirsk forest growing district considering the ratio of the same- and uneven-aged pine forests. The improvement of the system of forest management activities should be performed on a forest-typological basis in combination with the division of plantings into high- and low-quality.

Keywords: Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.), age generation, uneven-aged forest stand, ribbon forest, forest type, quality class, area

Funding: the study was performed as a part of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists, candidates of sciences, No. MK-293.2022.5.

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

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

For citation: Osipenko A. E., Zalesov S. V. (2023). Age differences of pine stands as a factor of harmonization of the system of forest management activities in ribbon forests of the Altai Krai. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 129-145 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/9>.

Received 15.03.2023. *Revised* 23.03.2023. *Accepted* 24.03.2023. *Published online* 15.05.2023.

Введение

Данные о возрастной структуре древостоев позволяют оценивать закономерности формирования фитоценозов, процессы смены возрастных поколений, а также динамику их таксационных пока-

зателей. Кроме того, возрастная структура влияет на назначаемые хозяйственные мероприятия, что особенно важно для уникальных ленточных боров Алтайского края в современных условиях [15]. Так, для одновозрастных сосновых древостоев рекомен-

дуются чересполосные постепенные, равномерно-постепенные и комбинированные выборочные рубки, а для разновозрастных – добровольно-выборочные, группово-выборочные, равномерно-постепенные, группово-постепенные и длительно-постепенные рубки [4, 9, 26]. Однако на сегодняшний день в районе исследований одновозрастные сосняки рубятся преимущественно добровольно-выборочными рубками [7]. Не смотря на то, что данный вид рубки способствует появлению большого количества подроста [3, 12, 13, 20], особенно в условиях типов леса сухой бор пологих всхолмлений и свежий бор, он не позволяет сформировать второй ярус древостоя в одновозрастных сосняках [25].

Существует мнение о целесообразности формирования в условиях ленточных боров разновозрастных древостоев. Так как такие древостои позволяют поддерживать лесные экосистемы в состоянии постоянного, непрерывного и эффективного функционирования [7, 31, 32, 35]. При этом формировать разновозрастные древостои предлагается рубками обновления и переформирования [1, 7; 14]. Положительный опыт применения рубок обновления в нашей стране имеется [8].

По данным А.Ю. Толстикова [25] абсолютное большинство сосновых насаждений ленточных боров Алтайского края представлено чистыми одноярусными древостоями из деревьев нескольких поколений. Подобная закономерность описана и в других работах [6, 22, 39]. Наличие 2-4 поколений сосны в сосновых древостоях, в том числе и ленточных боров, рядом исследователей объясняется часто повторяющимися низовыми лесными пожарами [2, 27, 28, 34]. Другие исследования свидетельствуют, что волнообразное восстановление популяций сосны обыкновенной не обязательно должно быть обусловлено лесными пожарами [16; 29]. В условиях ленточных боров одновозрастные древостои формируются на сплошных гарях и вырубках в благоприятные по увлажнению годы, а разновозрастные сложные по форме древостои – в неблагоприятные по увлажнению годы [19]. Разновозрастность подавляющего большинства сосновых лесов в условиях Сибири возникает в результате восстановительно-возрастных смен в них. При этом

обусловлены они зонально-типологическими условиями, характером пирогенного и антропогенного воздействия на насаждения [11]. К подобным выводам пришли ученые, изучавшие сосняки в бореальной части Швеции [36]. По данным Е.Г. Парамонова [21] разновозрастность сосняков в ленточных борах обусловлена гибелью соснового подроста в летний период из-за ожога корневой шейки при повышении температуры на поверхности почвы до 60°C. При этом накопление деревьев различного возраста в сосняках происходит за счет отдельных экземпляров подроста, выживающих в конусе полуденной тени от материнских деревьев. Помимо высокой температуры почвы естественное лесовосстановление может быть затруднено и рядом других факторов [37, 38].

Цель работы: выявление закономерностей формирования естественных сосновых насаждений и определение соотношения одновозрастных и разновозрастных сосняков в различных типах леса ленточных боров Алтайского края.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Объектом исследования в рамках данной работы являются сосновые древостои естественного происхождения, произрастающие в ленточных борах Алтайского края. Предмет исследований – соотношение одно- и разновозрастных сосняков, закономерности их формирования.

Климатические особенности района исследований, распределение площади лесных земель по типам леса и климатическим зонам приводились в нашей предыдущей работе [17], а также в монографии коллектива авторов [7].

Сбор данных

Исследования основаны на анализе электронной выделочной базы данных (БД) в формате «.xlsx», содержащей характеристику более 268 тыс. таксационных выделов общей площадью 1014 тыс. га. Имеющиеся данные характеризуют лесной фонд района исследований по состоянию на 2001-2011 годы. В БД содержатся сведения о лесном фонде одиннадцати лесничеств Алтайского края: Барнаульское, Волчихинское, Ключевское, Кулундинское, Лебяжинское, Новичихинское, Озеро-Кузнецовское, Павловское, Панкрушихинское,

Ракитовское, Степно-Михайловское. Общая площадь лесных земель в анализируемой БД составляет 840,6 тыс. га, в том числе земли, на которых расположены леса – 757,4 тыс. га. Насаждения естественного происхождения занимают 653,5 тыс. га, в том числе с преобладанием сосны обыкновенной – 517,7 тыс. га.

В БД также приведены сведения о лесных культурах, насаждениях с культурами под пологом леса и так называемые «насаждения с породами искусственного происхождения». Их общая площадь – 103,9 тыс. га, в том числе с преобладанием сосны обыкновенной – 97,4 тыс. га. Однако в рамках данной статьи указанные категории земель были исключены из обработки.

Для распределения площади исследуемых сосняков по лесничествам и количеству возрастных поколений в программе MS Excel 2013 была составлена сводная таблица. При формировании сводной таблицы были выставлены следующие фильтры: преобладающая порода – сосна обыкновенная, категория земель – насаждения естественного происхождения. Количество поколений сосны по каждой строке БД было определено при помощи комбинации программных формул и ручного ввода текста в соответствующий столбец БД.

Под возрастным поколением древостоя нами понимается совокупность деревьев в разновозрастном древостое, различающихся по возрасту не более чем на два класса возраста. При этом в соответствии с лесоустроительной инструкцией, действовавшей на момент проведения исследований, «возрастные поколения, относящиеся к молоднякам, средневозрастным, приспевающим частям разновозрастного лесного насаждения выделяются при доле их участия в составе лесного насаждения не менее 20 % и (или) при разнице в средних диаметрах возрастных поколений не менее 6 сантиметров. Выделение возрастного поколения древесной породы, относящегося к спелой и перестойной частям разновозрастного лесного насаждения, осуществляется если доля его в общем запасе древесины лес-

ного насаждения составляет не менее 20%. При этом спелая и перестойная части разновозрастного лесного насаждения, занимающие в составе лесного насаждения менее 20%, учитываются единичными деревьями».

Сосновые элементы леса, запас древесины которых составляет до 5% от общего запаса древесины лесного насаждения (яруса), записанные в формулу состава со знаком «+», также считались отдельным поколением и учитывались при определении количества возрастных поколений.

Анализ данных

Статистическая обработка данных производилась в программах Statsoft STATISTICA 8 и MS Excel 2013 [24]. При проведении кластерного анализа применялся метод полной связи, а для количественной оценки близости использовалось Евклидово расстояние. При расчете критерия χ^2 при сопоставлении двух распределений был принят уровень значимости $\leq 0,05$. Число степеней свободы было принято 2, так как данные были сгруппированы в три категории: одновозрастные сосняки, сосняки из двух поколений, сосняки из трех и более поколений.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведено распределение площади естественных сосняков по лесничествам и количеству возрастных поколений сосны. Наибольшая доля сосняков естественного происхождения (67,5 % площади) состоит из двух или трех поколений сосны. На долю одновозрастных сосняков приходится лишь 20,4 % площади.

По количеству ярусов в ленточных борах выделены одно- и двухъярусные сосняки. Доля двухъярусных древостоев в имеющемся наборе данных составляет 3,7 % по количеству и 5,3 % площади. Выделение второго яруса в большинстве случаев весьма затруднено из-за высокой вертикальной сомкнутости полога.

Распределение площади естественных сосняков по лесничествам
и количеству возрастных поколений сосны, га / %

Table 1

Distribution of the natural pine forest area by forest district and the number of pine age generations, ha/%

Лесничество Forest district	Количество возрастных поколений, шт. Number of age generations, pcs							Итого Total
	1	2	3	4	5	6	7	
Барнаульское Barnaul'skoe	<u>2308</u> 13,2	<u>8424</u> 48,4	<u>6315</u> 36,2	<u>380</u> 2,2	<u>1</u> 0,0	-	-	<u>17428</u> 100
Павловское Pavlovskoe	<u>13539</u> 33,5	<u>15867</u> 39,2	<u>8625</u> 21,3	<u>2167</u> 5,4	<u>248</u> 0,6	-	-	<u>40446</u> 100
Кулундинское Kulundinskoe	<u>7776</u> 24,9	<u>12968</u> 41,6	<u>7646</u> 24,5	<u>2508</u> 8,0	<u>313</u> 1,0	<u>12</u> 0,0	-	<u>31223</u> 100
Панкрушихинское Pankrushihinskoe	<u>7342</u> 21,2	<u>12302</u> 35,4	<u>9793</u> 28,2	<u>4445</u> 12,8	<u>847</u> 2,4	-	-	<u>34729</u> 100
Новичихинское Novichihinskoe	<u>11023</u> 31,7	<u>13255</u> 38,1	<u>8675</u> 24,9	<u>1822</u> 5,2	<u>38</u> 0,1	-	-	<u>34813</u> 100
Волчихинское Volchihinskoe	<u>14121</u> 21,9	<u>27513</u> 42,6	<u>18365</u> 28,5	<u>4296</u> 6,7	<u>204</u> 0,3	-	-	<u>64499</u> 100
Лебяжинское Lebyazhinskoe	<u>5083</u> 10,9	<u>14380</u> 30,8	<u>18646</u> 39,9	<u>7336</u> 15,7	<u>1240</u> 2,7	<u>16</u> 0,0	-	<u>46701</u> 100
Ракитовское Rakitovskoe	<u>9068</u> 20,1	<u>17922</u> 39,7	<u>14063</u> 31,2	<u>3805</u> 8,4	<u>258</u> 0,6	-	-	<u>45116</u> 100
Степно-Михайловское Stepno-Mihajlovskoe	<u>5963</u> 11,2	<u>12842</u> 24,1	<u>17591</u> 33,0	<u>12665</u> 23,8	<u>3656</u> 6,9	<u>458</u> 0,9	<u>79</u> 0,1	<u>53254</u> 100
Озеро-Кузнецовское Ozero-Kuznecovskoe	<u>13848</u> 13,4	<u>36292</u> 35,0	<u>38379</u> 37,0	<u>13669</u> 13,2	<u>1383</u> 1,3	<u>93</u> 0,1	-	<u>103664</u> 100
Ключевское Klyuchevskoe	<u>15419</u> 33,6	<u>21763</u> 47,5	<u>7630</u> 16,6	<u>1012</u> 2,2	<u>28</u> 0,1	-	-	<u>45852</u> 100
Итого Total	<u>105490</u> 20,4	<u>193528</u> 37,4	<u>155728</u> 30,1	<u>54105</u> 10,4	<u>8216</u> 1,6	<u>579</u> 0,1	<u>79</u> 0,0	<u>517725</u> 100

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

В части исследуемых сосняков (9,2 % по количеству выделов и 10,6 % по площади) имеются единичные деревья сосны, которые также увеличивают возрастную дифференциацию насаждений, но при этом отдельным поколением или ярусом единичные деревья не считаются. Если при подсчете количества возрастных поколений все-таки учесть единичные деревья, то доля площади одновозрастных сосняков уменьшится на 3,2 %.

Наиболее сложные по возрастной структуре сосновые древостои, состоящие из семи поколений сосны, зафиксированы в Степно-Михайловском лесничестве. Таких древостоев насчитывается 9 шт., все они являются двухъярусными. Пример состава одного из древостоев: первый ярус –

4С(115)3С(160)3С(90), второй ярус – 3С(65)3С(45)2С(30)2С(15).

Лесничества в табл. 1 расположены в порядке их расположения с северо-востока на юго-запад Алтайского края (по нарастанию засушливости природно-климатических условий). Данный порядок лесничеств был установлен с целью подтверждения закономерности, описанной Е.Г. Парамоновым [21]. По его данным при продвижении с северо-востока на юго-запад региона дифференциация деревьев по возрасту увеличивается. Для проверки этой гипотезы к данным таблицы 1, выраженным в процентах, был применен кластерный анализ по методу полной связи (Complete Linkage). В результате анализа на рис. 1 рассматриваемые лесничества

ства были сгруппированы по принципу схожести
распределения площади естественных сосняков по

количеству возрастных поколений.

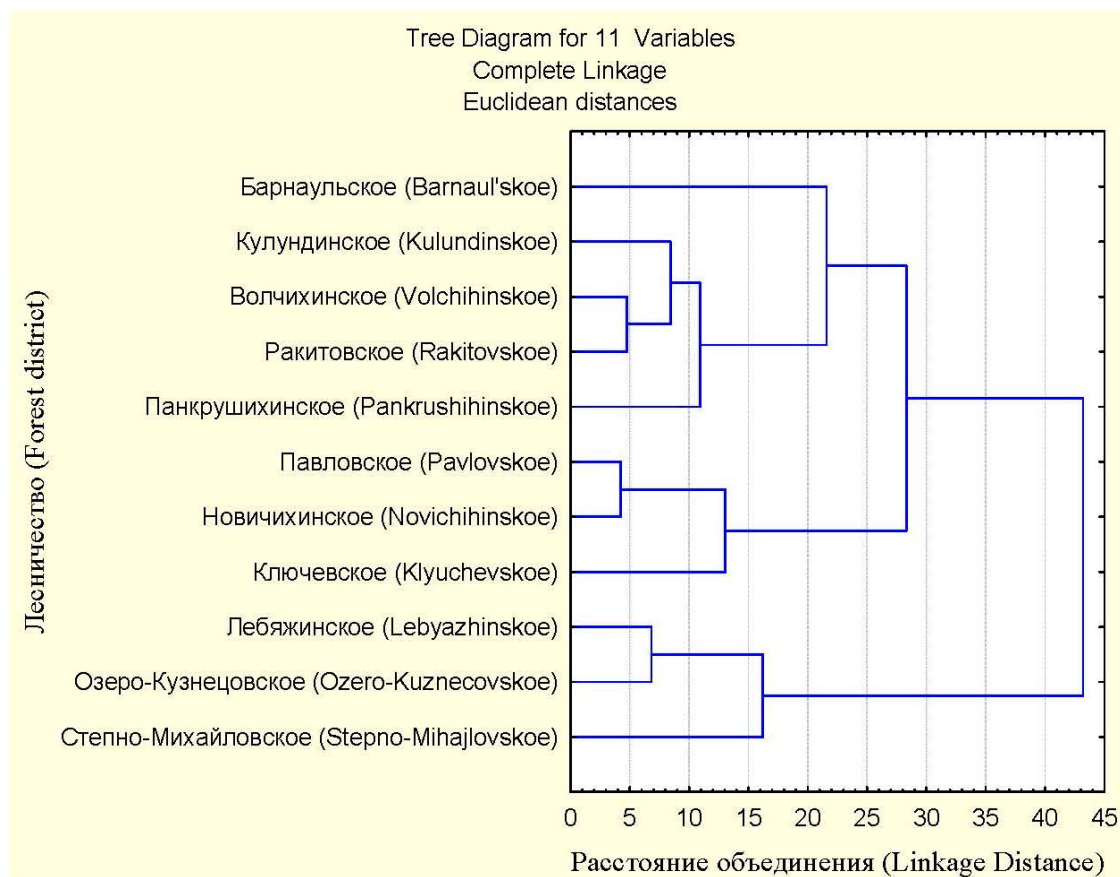


Рисунок 1. Древоподобная диаграмма для одиннадцати лесничеств

Figure 1. Tree diagram for eleven forestry

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

На дендрограмме (см. рис. 1) можно выделить четыре кластера: в первый входит только Барнаульское лесничество; во второй – Кулундинское, Волчихинское, Ракитовское, Панкрушихинское; в третий – Павловское, Новичихинское, Ключевское; в четвертый – Лебяжинское, Озеро-Кузнецовское, Степно-Михайловское. Первый кластер имеет самое северо-восточное положение, на его территории преобладают сосняки, состоящие из двух поколений сосны. Четвертый кластер состоит из лесничеств, расположенных довольно близко друг к другу, и находится в юго-западной части региона. В лесничествах четвертого кластера преобладают сосняки, состоящие из трех поколений сосны. В

состав второго и третьего кластеров, на территории которых преобладают сосняки, состоящие из двух поколений, вошли лесничества из совершенно разных частей Алтайского края. Исходя из полученных результатов, можно заключить, что описанная выше закономерность подтверждается только частично. Вероятно, на увеличение дифференциации деревьев по возрасту влияет не географическое расположение как таковое, а лесорастительные условия, которые меняются не равномерно, ухудшаясь с северо-востока на юго-запад, а могут становиться то лучше, то хуже, в зависимости от макро- и мезорельефа, глубины залегания грунтовых вод, почвенных условий [10]. В связи с этим целе-

Природопользование

сообразно рассмотреть изменение возрастной структуры сосняков в зависимости от типов леса (табл. 2), которые в районе исследований очень тесно связаны с типом лесорастительных условий [19].

В табл. 2 типы леса расположены в порядке увеличения влажности почвы: в условиях типа леса СБВ грунтовые воды находятся на глубине 10-15 метров, а в условиях СГРС грунтовые воды находятся на глубине 0,3-0,4 м и зачастую наблюдается застойное избыточное увлажнение [19].

Данные табл. 2 свидетельствуют, что с увеличением обеспеченности сосняков влагой доля одновозрастных древостоев возрастает; доля сосняков, состоящих из трех и более поколений сосны, уменьшается; доля древостоев, состоящих из двух возрастных поколений сосны, меняется незначительно. Средневзвешенное количество возрастных поколений в различных типах леса следующее: СБВ – 2,3; СБП – 2,6; СВБ – 2,3; СПР – 2,1; ТРБ – 2,0; СГРС – 1,7. Похожий результат был получен в исследованиях [33].

Таблица 2

Распределение площади естественных сосняков по типам леса
и количеству возрастных поколений сосны, га / %

Table 2

Distribution of the natural pine forest area by forest types and the number of pine age generations, ha/%

Тип леса Forest Type	Средний класс бонитета Average Quality Class	Количество возрастных поколений, шт. Number of Age Generations, pcs					Итого Total
		1	2	3	4	5 - 7	
Сухой бор высоких всхолмлений (СБВ) Dryforest on high slopes (DFH)	IV,5	<u>326</u> 16,8	<u>748</u> 38,5	<u>730</u> 37,6	<u>136</u> 7,1	-	<u>1940</u> 100
Сухой бор пологих всхолмлений (СБП) Dry forest on gentle slopes (DFG)	III,2	<u>29534</u> 14,0	<u>73619</u> 34,9	<u>71873</u> 34,0	<u>30336</u> 14,4	<u>5848</u> 2,7	<u>211210</u> 100
Свежий бор (СВБ) Fresh forest (FRF)	II,2	<u>47789</u> 22,3	<u>80143</u> 37,4	<u>63622</u> 29,7	<u>19993</u> 9,3	<u>2808</u> 1,3	<u>214355</u> 100
Соснякпристепной (СПР) Steppe pine forest (SPF)	II,3	<u>642</u> 28,3	<u>909</u> 40,0	<u>577</u> 25,4	<u>135</u> 5,9	<u>9</u> 0,4	<u>2272</u> 100
Травяной бор (ТРБ) Grass forest (GRF)	I,8	<u>26826</u> 30,8	<u>37834</u> 43,4	<u>18852</u> 21,6	<u>3479</u> 4,0	<u>209</u> 0,2	<u>87200</u> 100
Согра сосновая (СГРС) Pinesogra (PSGR)	III,5	<u>373</u> 49,9	<u>275</u> 36,7	<u>74</u> 9,9	<u>26</u> 3,5	-	<u>748</u> 100
Итого Total	II,4	<u>105490</u> 20,4	<u>193528</u> 37,4	<u>155728</u> 30,1	<u>54105</u> 10,4	<u>8874</u> 1,7	<u>517725</u> 100

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

В табл. 3 приведены р-значения (p-value), полученные при расчете критерия χ^2 для всех комбинаций пар исследуемых типов леса. Так как принятый уровень значимости составляет $\leq 0,05$, р-value более 0,05 свидетельствуют об отсутствии достоверных различий в распределении сосняков по количеству возрастных поколений в пределах типов леса. Таким образом, достоверные отличия

наблюдаются во всех парах типов леса кроме СБВ и СБП, СВБ; СПР и СВБ, ТРБ. Однако следует отметить, что типы леса СБВ и СПР, имеющие сходство в характере распределения сосняков по количеству возрастных поколений с другими типами леса, занимают всего 0,8 % от площади всех исследуемых сосняков. Поэтому гораздо больший интерес представляют достоверные различия между

тремя наиболее распространенными типами леса (СБП, СБВ, ТРБ).

С учетом того, что в пределах одного типа леса продуктивность древостоев может довольно сильно варьировать, например, по причине различной глубины залегания грунтовых вод, целесооб-

разно проанализировать распределение площади исследуемых сосняков по классам бонитета (табл. 4). К тому же данный показатель лучше подходит для количественной оценки потенциальной продуктивности насаждений [23].

Таблица 3

Результаты проверки гипотезы о согласии частот распределения одно- и разновозрастных сосняков по методу χ^2 для различных типов леса

Table 3

Results of testing the hypothesis on the agreement of the distribution frequencies of the same- and even-aged pine forests according to the χ^2 method for various forest types (for various quality classes)

Тип леса Forest Type	СБВ DFH	СБП DFG	СБВ FRF	СПП SPF	ТРБ GRF
СБП DFG	0,420	-	-	-	-
СБВ FRF	0,393	0,046	-	-	-
СПП SPF	0,007	$5,15 \cdot 10^{-5}$	0,152	-	-
ТРБ GRF	$3,10 \cdot 10^{-5}$	$1,83 \cdot 10^{-8}$	0,003	0,403	-
СГРС PSGR	$2,17 \cdot 10^{-21}$	$2,19 \cdot 10^{-29}$	$9,04 \cdot 10^{-16}$	$3,01 \cdot 10^{-8}$	$4,52 \cdot 10^{-5}$

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Как и в случае с распределением по типам леса, в табл. 3 наблюдается тенденция на увеличение доли разновозрастных древостоев при снижении продуктивности древостоев, которую в значительной степени обеспечивает доступность влаги в почве [5, 10, 30]. Средневзвешенное количество поколений в древостоях, характеризующихся различными классами бонитета, следующее: I класс и выше – 1,8; II – 2,2; III – 2,5; IV – 2,6; V – 2,2 шт.

Значение средневзвешенного количества поколений древостоев пятого класса бонитета ниже ожидаемого, что обусловлено тем, что данным классом бонитета характеризуются древостои, произрастающие в условиях типов леса СБВ, СБП и СГРС, имеющие кардинально разные условия произрастания. Если проанализировать данные по древостоям пятого класса бонитета отдельно по указанным типам леса, то для типа леса СБВ наиболее представленная категория древостоев – сосняки, состоящие из трех возрастных поколений сосны; для СБП – сосняки, состоящие из двух поколений сосны; для СГРС – сосняки, состоящие из одного возрастного поколения сосны. Последнее еще раз

подтверждает предположение о том, что в районе исследований именно ограниченный доступ к влаге является одним из главных факторов, определяющих формирование разновозрастных древостоев. Данный факт приобретает особую важность с учетом глобальных изменений климата [40, 41].

По отношению к данным табл. 4 (аналогичным образом, как и к данным табл. 2) был применен критерий χ^2 . Полученные p-value приведены в таблице 5. В результате анализа было установлено, что достоверные различия в распределении сосняков по количеству возрастных поколений наблюдаются для всех пар классов бонитета кроме III и IV; V и II, III, IV. Таким образом, при совершенствовании системы лесохозяйственных мероприятий целесообразно делить сосняки на две категории (высоко- и низкобонитетные), а при значительной доле сосняков первого класса бонитета в пределах лесничества, возможно, стоит высокобонитетные древостои поделить на сосняки первого (и выше) класса бонитета и на сосняки второго класса бонитета.

Природопользование

Таблица 4

Распределение площади естественных сосняков по классам бонитета и количеству возрастных поколений сосны, га / %

Table 4

Distribution of the natural pine forests area by quality classes and the number of pine age generations, ha / %

Класс бонитета Quality Class	Преобладающий тип леса (в порядке убывания) Dominant Forest Type (in Descending Order)	Количество возрастных поколений, шт. Number of Age Generations, pcs					Итого Total
		1	2	3	4	5 - 7	
I и выше I and higher	ТРБ, СВБ GRF, FRF	<u>15180</u> 41,3	<u>14948</u> 40,7	<u>5777</u> 15,7	<u>826</u> 2,2	<u>24</u> 0,1	<u>36755</u> 100
II	СВБ, ТРБ FRF, GRF	<u>49640</u> 23,7	<u>84935</u> 40,5	<u>58632</u> 28,0	<u>15054</u> 7,2	<u>1373</u> 0,6	<u>209634</u> 100
III	СБП, СВБ DFG, FRF	<u>32826</u> 15,3	<u>75302</u> 35,1	<u>70009</u> 32,7	<u>30159</u> 14,1	<u>6096</u> 2,8	<u>214392</u> 100
IV	СБП DFG	<u>7497</u> 13,6	<u>17739</u> 32,1	<u>20709</u> 37,4	<u>7995</u> 14,5	<u>1381</u> 2,4	<u>55321</u> 100
V	СВБ, СБП DFH, DFG	<u>347</u> 21,4	<u>604</u> 37,2	<u>601</u> 37,0	<u>71</u> 4,4	-	<u>1623</u> 100
Итого Total		<u>105490</u> 20,4	<u>193528</u> 37,4	<u>155728</u> 30,1	<u>54105</u> 10,4	<u>8874</u> 1,7	<u>517725</u> 100

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 5

Результаты проверки гипотезы о согласии частот распределения одно- и разновозрастных сосняков по методу χ^2 для различных классов бонитета

Table 5

Results of testing the hypothesis on the agreement of the distribution frequencies of the same- and even-aged pine forests according to the χ^2 method for various quality classes

Класс бонитета Quality Class	I и выше I and higher	II	III	IV
II	$6,77 \cdot 10^{-5}$	-	-	-
III	$4,53 \cdot 10^{-14}$	0,026	-	-
IV	$7,01 \cdot 10^{-20}$	0,001	0,826	-
V	$5,08 \cdot 10^{-7}$	0,730	0,323	0,056

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Одним из определяющих факторов для формирования разновозрастных сосняков и назначения хозяйственных мероприятий является относительная полнота древостоев [7]. Распределение площади исследуемых сосняков по полнотам древостоев и количеству возрастных поколений приведено в табл. 6. К данным табл. 6 был применен критерий χ^2 . Полученные р-значения приведены в табл. 7.

Данные табл. 6 свидетельствуют об увеличении доли разновозрастных сосняков при увеличении относительной полноты. При этом наибольшая до-

ля древостоев, состоящих из трех возрастных поколений и более, наблюдается при полноте 0,5 и менее. Достоверных различий в количестве поколений между древостоями с полнотами 0,3-0,5 не выявлено. Также отсутствуют достоверные различия между древостоями с полнотами 0,7-0,9 и 0,8-1,0.

Средневзвешенное количество возрастных поколений при переходе от полноты 0,3 к полноте 1,0 плавно увеличивается от 2,7 до 2,0 шт. Корреляционный анализ между средневзвешенным количеством возрастных поколений и относительной

полнотой древостоев показал очень сильную обратную связь (-0,989). Для проверки значимости коэффициента корреляции был посчитан t-критерий Стьюдента. Его величина составила

16,4. Полученное значение t-критерия свидетельствует о значимости полученного коэффициента корреляции при уровне значимости $\leq 0,01$.

Таблица 6

Распределение площади естественных сосняков по относительным полнотам и количеству возрастных поколений сосны, га / %

Table 6

Distribution of the natural pine forests area by relative densities and the number of pine age generations, ha / %

Относительная полнота Relative density	Количество возрастных поколений, шт. Number of Age Generations, pcs					Итого Total
	1	2	3	4	5 - 7	
0,3	<u>3993</u> 9,3	<u>15009</u> 35,1	<u>15852</u> 37,1	<u>6239</u> 14,6	<u>1661</u> 3,9	<u>42754</u> 100
0,4	<u>8391</u> 13,7	<u>19266</u> 31,6	<u>22326</u> 36,6	<u>9242</u> 15,1	<u>1804</u> 3,0	<u>61029</u> 100
0,5	<u>11725</u> 14,2	<u>28928</u> 35,1	<u>28552</u> 34,6	<u>11600</u> 14,0	<u>1708</u> 2,1	<u>82513</u> 100
0,6	<u>20615</u> 19,0	<u>41817</u> 38,6	<u>32942</u> 30,4	<u>11561</u> 10,7	<u>1446</u> 1,3	<u>108381</u> 100
0,7	<u>29540</u> 24,3	<u>48134</u> 39,6	<u>33080</u> 27,2	<u>9396</u> 7,8	<u>1342</u> 1,1	<u>121492</u> 100
0,8	<u>21781</u> 29,6	<u>29467</u> 40,0	<u>17348</u> 23,6	<u>4389</u> 6,0	<u>588</u> 0,8	<u>73573</u> 100
0,9	<u>7708</u> 33,5	<u>8967</u> 38,9	<u>4639</u> 20,1	<u>1411</u> 6,1	<u>314</u> 1,4	<u>23039</u> 100
1,0	<u>1737</u> 35,1	<u>1940</u> 39,3	<u>989</u> 20,0	<u>267</u> 5,4	<u>11</u> 0,2	<u>4944</u> 100
Итого Total	<u>105490</u> 20,4	<u>193528</u> 37,4	<u>155728</u> 30,1	<u>54105</u> 10,4	<u>8874</u> 1,7	<u>517725</u> 100

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Таблица 7

Результаты проверки гипотезы о согласии частот распределения одно- и разновозрастных сосняков по методу χ^2 для различных относительных полнот

Table 7

Results of testing the hypothesis on the agreement of the distribution frequencies of the same- and even-aged pine forests according to the χ^2 method for various relative densities

Относительная полнота Relative density	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,4	0,403	-	-	-	-	-	-
0,5	0,339	0,711	-	-	-	-	-
0,6	$9,19 \cdot 10^{-3}$	0,043	0,207	-	-	-	-
0,7	$3,90 \cdot 10^{-5}$	$3,66 \cdot 10^{-4}$	$4,96 \cdot 10^{-3}$	0,320	-	-	-
0,8	$2,04 \cdot 10^{-8}$	$3,50 \cdot 10^{-7}$	$1,54 \cdot 10^{-5}$	0,014	0,364	-	-
0,9	$9,02 \cdot 10^{-11}$	$2,42 \cdot 10^{-9}$	$2,03 \cdot 10^{-7}$	$8,19 \cdot 10^{-4}$	0,076	0,681	-
1,0	$1,41 \cdot 10^{-12}$	$4,53 \cdot 10^{-11}$	$7,18 \cdot 10^{-9}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$	0,022	0,412	0,890

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Как и предполагалось, относительная полнота тесно связана с количеством возрастных поколений. Однако низкая относительная полнота древостоев может являться не только причиной формирования разновозрастных сосняков, но и следствием того, что разновозрастные сосняки эксплуатируются более интенсивно, чем одновозрастные. Так, в соответствии с Лесохозяйственными регламентами лесничеств ленточных боров, вступившими в силу с 30 декабря 2011 г., при проведении группово-выборочных рубок, назначаемых преимущественно в разновозрастных сосняках, было разрешено снижать полноту древостоев до 0,3 (что противоречит Правилам заготовки древесины в РФ) [18]. Такая же норма была прописана в регламентах, утвержденных 1 января 2019 г. И только с 2022 года это нарушение начали убирать из новых Лесохозяйственных регламентов.

Ранее проведенные исследования [18] показали, что в ленточных борах Алтайского края одноярусные сосняки, протаксированные одним поколением, могут состоять из деревьев, различающихся по возрасту на 65-80 и более лет. Это можно объяснить, как недостаточной долей запаса деревьев, отличающихся по возрасту от основного элемента леса, так и ошибкой таксатора. Вероятно, может быть и обратная ситуация, когда одновозрастные сосняки таксируются как разновозрастные, однако, с учетом большого объема данных, такие ошибки не могли значительно повлиять на полученные результаты.

Попытка оптимизации системы рубок с учетом разновозрастности сосновых древостоев ленточных боров была предпринята в 90-е годы двадцатого века, когда широкое применение получили рубки обновления и переформирования. Однако после 2008 года данные виды рубок стали применяться в крайне редких случаях [7]. Вероятной причиной тому послужили крайне расплывчатые требования к рубкам обновления и переформирования и условия их применения, позволившие изреживать древостои до состояния редин. Последнее свидетельствует о необходимости научного обоснования параметров данного вида рубок перед повсеместным внедрением в районе исследований.

С 2019 года, когда был выделен Алтай-Новосибирский район лесостепей и ленточных боров, интерес к рубкам обновления и переформирования вновь вырос. В актуальные Правила ухода за лесами для указанного лесного района были внесены нормативы мероприятий обновления, переформирования и реконструкции лесных насаждений, что свидетельствует о планах возобновить практику проведения данных рубок.

Дальнейшие исследования могут быть посвящены оценке влияния рубок обновления и переформирования, проводившихся в конце 20-го и начале 21-го века, на одно- и разновозрастные сосняки различных типов леса.

Выводы

1. Системы рубок ухода и рубок спелых, перестойных лесных насаждений Алтай-Новосибирского лесорастительного района лесостепей и ленточных боров нуждаются в доработке. При совершенствовании систем рубок необходимо учесть соотношения одновозрастных и разновозрастных сосновых древостоев.

2. Сосняки естественного происхождения в районе исследований состоят преимущественно из двух-трех поколений сосны. На их долю приходится 67,5% площади естественных насаждений с преобладанием сосны. Одновозрастные сосняки занимают 20,4% площади. На долю сосняков с наличием четырех и более возрастных поколений приходится 12,1% площади.

3. При переходе от сырых к очень сухим условиям произрастания доля разновозрастных сосняков увеличивается. В связи с этим совершенствование системы лесохозяйственных мероприятий должно вестись на лесотипологической основе в сочетании с делением насаждений на высоко- и низкобонитетные.

4. Сосняки с относительной полнотой 0,5 и менее зачастую состоят из большего количества возрастных поколений, что обусловлено недостаточным количеством света под пологом таких древостоев. При этом низкая относительная полнота разновозрастных древостоев может являться следствием более интенсивной их эксплуатации по сравнению с одновозрастными сосняками.

Список литературы

1. Ананьев В.А., Синькевич С.М. Обоснование ведения хозяйства в защитных лесах Зеленого пояса Фенноскандии с сохранением экосистемных функций. Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2019;4:182-189. DOI: <http://dx.doi.org/10.17076/them1008>
2. Башегуров К. А., Залесова Е. С., Толстиков А. Ю., Усов М. В. Последствия группово-выборочных рубок в сосняках ленточных боров Алтая. Успехи современного естествознания. 2019;9:13-18. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40535914>
3. Башегуров К. А., Малиновских А. А., Савин М. А., Годовалов Г. А. Специфика накопления подроста на горях в различных лесорастительных подзонах ленточных боров Алтая. Леса России и хозяйство в них. 2020;1(72):4-14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43806599>
4. Белов Л. А., Клям О. А., Сураев П. Н. Влияние выборочных рубок на подрост предварительной генерации в сосняках ягодникового типа леса. Леса России и хозяйство в них. 2022;1(80):37-47. DOI: <http://doi.org/10.51318/FRET.2021.65.76.004>
5. Беховых Ю. В., Болотов А. Г. Сравнительный анализ продуктивных запасов влаги дерново-подзолистых почв ленточных боров Алтайского края в зонах засушливой и сухой степи. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012;2(88):42-46. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17356629>
6. Дебков Н. М., Кузменкин Д. В., Грибков А. В., Пожидаева Л. В. О предельном возрасте сосны обыкновенной и ее древостоев в ленточных борах Алтайского края. Устойчивое лесопользование. 2021;1(65):53-61. DOI: http://doi.org/10.47364/2308-541X_2021_65_1_53
7. Желдак В. И., Маленко А. А., Мартынюк А. А., Сидоренков В. М., Лямцев Н. И., Коршунов Н. А., Корякин В. А., Рябцев О. В., Малиновских А. А., Дорощенко Э. В., Конюшенков М. Е., Курсыкова Е. С., Сидоренкова Е. М., Трушина И. Г., Трушина Н. И. Ленточные боры и ведение хозяйства в них: моногр. / Под общ. ред. чл.-корр. РАН А. А. Мартынюка. Пушкино: ВНИИЛМ. 2022:216. ISBN 978-5-94219-280-8 Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50262485>
8. Залесов С. В. Бачурина А. В., Бачурина С. В. Состояние сосновых насаждений после первого приема рубок обновления. Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2015;1(33):105-109. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23478273>
9. Залесова Е. С., Залесов С. В., Толстиков А. Ю., Усов М. В., Шубин Д. А. Комбинированные выборочные рубки в защитных лесах. Актуальные проблемы лесного комплекса. 2017;47:19-22. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29196612>
10. Кулагина В. В. Современное состояние Барнаульского ленточного бора. География и природопользование Сибири. 2016;22:76-81. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32574603>
11. Кутявин И. Н., Манов А. В., Осипов А. Ф., Кузнецов М. А. Строение древостоев северотаежных сосняков. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021;2(380):86-105. DOI: <http://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-86-105>
12. Малиновских А. А., Маленко А. А. Процесс естественного возобновления сосны обыкновенной после выборочных рубок в спелых и перестойных насаждениях в ленточных борах Алтайского края. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018;1(159):67-72. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32357639>
13. Малиновских А. А., Маленко А. А. Влияние живого напочвенного покрова на процесс естественного возобновления сосны обыкновенной после рубок в спелых и перестойных насаждениях в ленточных борах Алтайского края. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017;12(158):58-64. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30677132>
14. Мартынюк А. А., Родин С. А., Рябцев О. В. Инновационному развитию нет альтернативы. Лесохозяйственная информация. 2019;3:7-20. DOI: <http://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.01>

15. Мартынюк А.А., Сидоренков В.М., Желдак В.И., Лямцев Н.И., Рябцев О.В., Жафяров А.В. Lentочные боры Алтайского края – состояние и совершенствование хозяйства в них. Лесохозяйственная информация. 2019;1:33–48. DOI: <http://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.03>
16. Мухин А. К. Особенности динамики лишайниковых сосняков в условиях подтопления Рыбинским водохранилищем. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022;4:52-69. DOI: <http://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-52-69>
17. Осипенко А. Е., Залесов С. В., Белов Л. А., Шубин Д. А. Рост по высоте и диаметру сосновых древостоев в Западно-Сибирском подтаежно-лесостепном районе Алтайского края. Лесохозяйственная информация. 2019;1:56–66. DOI: <http://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.05>
18. Осипенко А. Е., Осипенко Р. А., Залесов С. В. Возрастная структура сосновых древостоев в Алтае-Новосибирском районе лесостепей и ленточных боров. Лесохозяйственная информация. 2020;3:89–100. DOI: <http://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.08>
19. Осипенко А.Е. Рост и развитие искусственных и естественных сосновых древостоев в Алтае-Новосибирском районе лесостепей и ленточных боров: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Екатеринбург. 2020:195. Режим доступа: https://usfeu.ru/media/filer_public/c0/14/c014a970-123c-44f0-ad45-c91159d8dde6/dissertatsia_osipenko_-_okonch.pdf
20. Парамонов Е. Г. Лесовозобновительная роль добровольно-выборочных рубок в ленточных борах Алтая. Лесное хозяйство. 2015;2:16-17. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29225547>
21. Парамонов Е. Г. Экологические мероприятия в целях лесовосстановления в ленточных борах Алтайского края. Мир науки, культуры, образования. 2014;2(45):396-399. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21507215>
22. Парамонов Е. Г., Рыбкина И. Д. Lentочные боры Алтая в период потепления климата. Устойчивое лесопользование. 2017;3(51):33-39. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34958211>
23. Сальникова И. С., Воробьева Т. С., Нагимов З. Я., Зубова С. С., Орехова О. Н., Суслов А. В. Таксация леса. Ход роста насаждений. Екатеринбург: УГЛУ. 2020:130. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44847425>
24. Сиделев С. И. Математические методы в биологии и экологии: введение в элементарную биометрию. Ярославль: ЯрГУ. 2012:138. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19503498>
25. Толстиков А. Ю. Лесоводственная эффективность выборочных рубок спелых и перестойных насаждений и специализированных рубок ухода в ленточных борах Алтайского края: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Екатеринбург. 2019:162. Режим доступа: https://usfeu.ru/media/filer_public/e9/7c/e97c792f-2751-447a-85a1-5f60866099e3/dissertatsiia_tolstikov.pdf
26. Усов М. В., Залесов С. В., Шубин Д. А., Толстиков А. Ю., Белов Л. А. Перспективность применения чересполосных постепенных рубок в сосняках Алтая. Аграрный вестник Урала. 2017;1(155):44-48. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29027521>
27. Aakala T. Forest fire histories and tree age structures in Värriö and Maltio Strict Nature Reserves, northern Finland. Boreal Environment Research. 2018;23:209-219. URL: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/298938>
28. Adámek, M., Hadincová, V., Wild, J. Long-term effect of wildfires on temperate *Pinus sylvestris* forests: Vegetation dynamics and ecosystem resilience. Forest Ecology and Management, 2016;380:285–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.051>
29. Čugunovs M., Nikodemus O., Dauškane I., Brūmelis G. The colonization history of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in pristine and drained raised bogs in Latvia. Environmental and Experimental Biology. 2016;14(2):97-106. DOI: <https://doi.org/10.22364/eeb.14.14>
30. Dang H., Han H., Zhang X., Chen S., Li M., Liu C. Key Strategies Underlying the adaptation of Mongolian scots pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in sandy land under climate change: a review. Forests. 2022;13(6):846. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13060846>

31. Ducey, M.J.; Gunn, J.S.; Whitman, A.A. Late-Successional and Old-Growth Forests in the Northeastern United States: Structure, Dynamics, and Prospects for Restoration. *Forests*. 2013;4:1055-1086. DOI: <https://doi.org/10.3390/f4041055>
32. Duncker P. S., Barreiro S. M., Hengeveld G. M., Lind T., Mason W. L., Ambrozy S., Spiecker, H. Classification of Forest Management Approaches: A New Conceptual Framework and Its Applicability to European Forestry. *Ecology and Society*. 2012;17(4):51. URL: <http://www.jstor.org/stable/26269224>
33. Fahey R. T., Lorimer C. G. Persistence of pine species in late-successional forests: evidence from habitat-related variation in stand age structure. *Journal of vegetation science*. 2014;25(2):584-600. DOI: <https://doi.org/10.1111/jvs.12091>
34. Kitenberga M., Drobyshev I., Elferts D., Matisons R., Adamovics A., Katrevis J., Niklasson M., Jansons A. A mixture of human and climatic effects shapes the 250-year long fire history of a semi-natural pine dominated landscape of Northern Latvia. *Forest Ecology and Management*. 2019;441:192-201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.020>
35. Kuuluvainen T., Nummi P. Strategies for the Ecological Restoration of the Boreal Forest Facing Climate Change. *Boreal Forests in the Face of Climate Change: Sustainable Management*. Cham: Springer International Publishing. 2023:443-466. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6>
36. Lundqvist L., Ahlström M. A., Petter Axelsson E., Mörling T., Valinger E. Multi-layered Scots pine forests in boreal Sweden result from mass regeneration and size stratification. *Forest Ecology and Management*. 2019;441:176-181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.044>
37. McDowell N. G., Allen C. D., Anderson-Teixeira K., Aukema B. H., Bond-Lamberty B., Chini L., Clark J. S., Dietze M., Grossiord C., Hanbury-Brown A., Hurtt G. C., Jackson R. B., Johnson D. J., Kueppers L., Lichstein J. W., Ogle K., Poulter B., Pugh T. A. M., Seidl R., Turner M. G., Uriarte M., Walker A. P., Xu C. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*. 2020;368(6494):eaaz9463. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaz9463>
38. Ribeiro S., Cerveira A., Soares P., Fonseca T. Natural regeneration of maritime pine: A review of the influencing factors and proposals for management. *Forests*. 2022;13(3):386. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13030386>
39. Sandström J., Edman M., Jonsson B. G. Rocky pine forests in the High Coast Region in Sweden: Structure, dynamics and history. *Nature Conservation*. 2020;38:101-130. DOI: <https://doi.org/10.3897/natureconservation.38.34870>
40. Song, L., Zhu, J., Li, M., Zhang J., Li D. Water use strategies of natural *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* trees of different ages in Hulunbuir Sandy Land of Inner Mongolia, China, based on stable isotope analysis. *Trees*. 2018;32:1001–1011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1691-2>
41. Taeger S., Zang C., Liesebach M., Schneck V., Menzel A. Impact of climate and drought events on the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) provenances. *Forest Ecology and Management*. 2013;307:30–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.053>

References

1. Ananyev V. A., Sinkevich S. M. The rationale for forestry in protective forests in the green belt of Fennoscandia while preserving their ecosystem functions. *Transactions of the Karelian research Centre of the Russian academy of sciences*. 2019;4:182-189. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.17076/them1008>
2. Bashegurov K. A., Zalesova E. S., Tolstikov A. Yu., Usov M. V. Posledstviya gruppovo-vyborochnykh rubok v sosnyakah lentochnykh borov Altaya. [Consequence of group-selective felling in stripe pine forests of Altay]. *Uspekhi sovremennoye estestvoznaniya*. 2019;9:13-18. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40535914>
3. Bashegurov K. A., Malinovskikh A. A., Savin M. A., Godovalov G. A. Specifika nakopleniya podrosta na garyah v razlichnykh lesorastitel'nykh podzonah lentochnykh borov Altaya. [Specificity of undergrowth with accumulation on learned areal in different forest growing subzones of Altai belt boron]. *Forests of Russia and economy in them*. 2020;1(72):4-14. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43806599>
4. Belov L. A., Klyam O. A., Suraev P. N. Vliyanie vyborochnykh rubok na podrost predvaritel'noj generacii v sosnyakah yagodnikovogo tipa lesa. [The effect of selective logging on the undergrowth of preliminary generation in

berry-type pine forests]. Forests of Russia and economy in them. 2022;1(80):37-47. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.51318/FRET.2021.65.76.004>

5. Bekhoviy Yu. V., Bolotov A. G. Sravnitel'nyj analiz produktivnykh zapasov vlagi dernovo-podzolistykh pochv lentochnykh borov Altajskogo kraja v zonah zasushlivoj i suhoj stepi. [Comparative analysis of productive moisture deposits of soddy-podzolic soils of ribbon pine forests in Altai krai in the zones of arid and dry steppe]. Bulletin of Altai State Agricultural University. 2012;2(88):42-46. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17356629>

6. Debkov N. M., Kuzmenkin D. V., Gribkov A. V., Pozhidaeva L. V. O predel'nom vozraste sosny obyknovnoy i ee drevostoev v lentochnykh borah Altajskogo kraja. Sustainable forest management. 2021;1(65):53-61. DOI: http://doi.org/10.47364/2308-541X_2021_65_1_53

7. Zheldak V. I., Malenko A. A., Martynyuk A. A., Sidorenkov V. M., Lyamcev N. I., Korshunov N. A., Koryakin V. A., Ryabcev O. V., Malinovskih A. A., Doroshchenkova E. V., Konyushenkov M. E., Kursikova E. S., Sidorenkova E. M., Trushina I. G., Trushina N. I. Lentochnye bory i vedenie hozyajstva v nih: monograf. [Pine forests and its management: monograph]. Edited by member of the RAS A.Martynuik. Pushkino: VNIILM. 2022:216. ISBN 978-5-94219-280-8 (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50262485>

8. Zalesov S. V., Bachurina A. V., Bachurina S. V. Sostoyanie osnovnykh nasazhdenij posle pervogo priema rubok obnovleniya. [Pine forests after the first regeneration cut]. Bulletin of the Bashkir state agrarian university. 2015;1(33):105-109. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23478273>

9. Zalesova E. S., Zalesov S. V., Tolstikov A. Yu., Usov M.V., Shubin D. A. Kombinirovannye vyborochnye rubki v zashchitnykh lesah. [Combined selective logging in protective forests] Actual problems of the forest complex. 2017;47:19-22. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29196612>

10. Kulagina V. V. Sovremennoe sostoyanie Barnaul'skogo lentochnogo bora. [Current state of the Barnaul ribbon forest]. Geography and nature management of Siberia. 2016;22:76-81. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32574603>

11. Kutuyavin I. N., Manov A. V., Osipov A. F., Kuznecov M. A. Stroenie drevostoev severotaezhnykh sosnyakov. [Stand structure of northern taiga pine forests] Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 2021;2(380):86-105. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-2-86-105>

12. Malinovskih A. A., Malenko A. A. Process estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovnoy posle vyborochnykh rubok v spelykh i perestojnykh nasazhdeniyah v lentochnykh borah Altajskogo kraja. [Natural regeneration of scots pine after selective felling in mature and over-mature stands in belt pine forests of the Altai region]. Bulletin of Altai State Agricultural University. 2018;1(159):67-72. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32357639>.

13. Malinovskih A. A., Malenko A. A. Vliyaniye zhivogo napochvennogo pokrova na process estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovnoy posle rubok v spelykh i perestojnykh nasazhdeniyah v lentochnykh borah Altajskogo kraja. [Living soil cover influence on natural regeneration of scots pine after felling in mature and over-mature stands in belt pine forests of the Altai region]. Bulletin of Altai State Agricultural University. 2017;12(158):58-64. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30677132>.

14. Martynyuk A. A., Rodin S. A., Ryabcev O. V. Innovacionnomu razvitiyu net al'ternativy. [There is no Alternative to Innovative Development]. Forestry information. 2019;3:7-20. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.01>

15. Martynyuk A.A., Sidorenkov V.M., Zheldak V.I., Lyamcev N.I., Ryabcev O.V., Zhafyarov A.V. Lentochnye bory Altajskogo kraja – sostoyanie i sovershenstvovanie hozyajstva v nih. [Ribbon relict pine forests in the Altai territory – current forest management and its improvement]. Forestry information. 2019;1:33–48. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.03>

16. Muhin A. K. Osobennosti dinamiki lishajnikovyykh sosnyakov v usloviyakh podtopleniya Rybinskim vodohrani-lishchem. [Features of the Dynamics of Lichen Pine Forests under Flooding by the Rybinsk Reservoir]. Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 2022;4:52-69. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-52-69>.

17. Osipenko A. E., Zalesov S. V., Belov L. A., Shubin D. A. Rost po vysote i diametru sosnovykh drevostoev v Zapadno-Sibirskom podtaezhno-lesostepnom rajone Altajskogo kraja. [Growth in height and diameter of pine stands in the West Siberian subtaiga forest-steppe region of the Altai krai]. *Forestry information*. 2019;1:56–66. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.1.05>
18. Osipenko A. E., Osipenko R. A., Zalesov S. V. Vozrastnaya struktura sosnovykh drevostoev v Altai-Novosibirskom rajone lesostepej i lentochnyh borov. [Age structure and composition of pine stands in the Altai-Novosibirsk region of forest-steppe and ribbon forests]. *Forestry information*. 2020;3:89–100. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.08>
19. Osipenko A. E., Rost i razvitie iskusstvennyh i estestvennyh sosnovykh drevostoev v Altai-Novosibirskom rajone lesostepej i lentochnyh borov. [Growth and development of artificial and natural pine stands in the Altai-Novosibirsk region of forest-steppe and ribbon forests]: dissertation for the degree of Candidate of Agricultural Sciences: 06.03.02. Yekaterinburg. 2020:195. (In Russ.). URL: https://usfeu.ru/media/filer_public/c0/14/c014a970-123c-44f0-ad45-c91159d8dde6/dissertatsia_osipenko_-_okonch.pdf
20. Paramonov E. G. Lesovozobnovitel'naya rol' dobrovol'no-vyborochnykh rubok v lentochnyh borah Altaya. *Forestry*. 2015;2:16-17. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29225547>
21. Paramonov E. G. Ekologicheskie meropriyatiya v celyah lesovosstanovleniya v lentochnyh borah Altajskogo kraja. [Environmental measures for reforestation in the belt forests of the Altai krai]. *The world of science, culture, education*. 2014;2(45):396-399. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21507215>
22. Paramonov, E. G., Rybkina I. D. Lentochnye bory Altaya v period potepleniya klimata. [Ribbon forests of Altai in the period of climate warming]. *Sustainable forestry*. 2017;3(51):33-39. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34958211>.
23. Sal'nikova I. S., Vorob'eva T. S., Nagimov Z. Ya., Zubova S. S., Orekhova O. N., Suslov A. V. Taksaciya lesa. Hod rosta nasazhdenij. [Forest Inventory. Stand Development.]. Yekaterinburg: USFEU Publ.. 2020:130. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44847425>
24. Sidelev S.I. Matematicheskie metody v biologii i ekologii: vvedenie v elementarnuyu biometriyu [Mathematical Methods in Biology and Ecology: an Introduction to Elementary Biometrics]. Yaroslavl, YarSU Publ., 2012:138. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19503498>
25. Tolstikov A. Yu. Lesovodstvennaya effektivnost' vyborochnykh rubok spelyh i perestojnykh nasazhdenij i specializirovannykh rubok uhoda v lentochnyh borah Altajskogo kraja. [Silvicultural Efficiency of Selective Felling of Mature and Overmature Plantations and Specialized Thinning in Strip Pine Forests of the Altai Krai]: dissertation for the degree of Candidate of Agricultural Sciences: 06.03.02. Yekaterinburg. 2019:162. (In Russ.). URL: https://usfeu.ru/media/filer_public/e9/7c/e97c792f-2751-447a-85a1-5f60866099e3/dissertatsiia_tolstikov.pdf
26. Usov M. V., Zalesov S. V., Shubin D. A., Tolstikov A. Yu., Belov L. A. Prospects for the use of interlaced gradual logging in Altai pine forests. [Perspective of alternate strip felling in pine stands of Altai]. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2017;1(155):44-48. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29027521>
27. Aakala T. Forest fire histories and tree age structures in Värriö and Maltio Strict Nature Reserves, northern Finland. *Boreal Environment Research*. 2018;23:209-219. URL: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/298938>
28. Adámek, M., Hadincová, V., Wild, J. *Long-term effect of wildfires on temperate Pinus sylvestris forests: Vegetation dynamics and ecosystem resilience. Forest Ecology and Management*, 2016;380:285–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.08.051>
29. Čugunovs M., Nikodemus O., Dauškane I., Brūmelis G. The colonization history of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in pristine and drained raised bogs in Latvia. *Environmental and Experimental Biology*. 2016;14(2):97-106. DOI: <https://doi.org/10.22364/eeb.14.14>
30. Dang H., Han H., Zhang X., Chen S., Li M., Liu C. Key Strategies Underlying the adaptation of Mongolian scots pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in sandy land under climate change: a review. *Forests*. 2022;13(6):846. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13060846>

31. Ducey, M.J.; Gunn, J.S.; Whitman, A.A. Late-Successional and Old-Growth Forests in the Northeastern United States: Structure, Dynamics, and Prospects for Restoration. *Forests*. 2013;4:1055-1086. DOI: <https://doi.org/10.3390/f4041055>
32. Duncker P. S., Barreiro S. M., Hengeveld G. M., Lind T., Mason W. L., Ambrozny S., Spiecker, H. Classification of Forest Management Approaches: A New Conceptual Framework and Its Applicability to European Forestry. *Ecology and Society*. 2012;17(4):51. URL: <http://www.jstor.org/stable/26269224>
33. Fahey R. T., Lorimer C. G. Persistence of pine species in late-successional forests: evidence from habitat-related variation in stand age structure. *Journal of vegetation science*. 2014;25(2):584-600. DOI: <https://doi.org/10.1111/jvs.12091>
34. Kitenberga M., Drobyshev I., Elferts D., Matisons R., Adamovics A., Katrevics J., Niklasson M., Jansons A. A mixture of human and climatic effects shapes the 250-year long fire history of a semi-natural pine dominated landscape of Northern Latvia. *Forest Ecology and Management*. 2019;441:192-201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.020>
35. Kuuluvainen T., Nummi P. Strategies for the Ecological Restoration of the Boreal Forest Facing Climate Change. *Boreal Forests in the Face of Climate Change: Sustainable Management*. Cham: Springer International Publishing. 2023:443-466. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6>
36. Lundqvist L., Ahlström M. A., Petter Axelsson E., Mörling T., Valinger E. Multi-layered Scots pine forests in boreal Sweden result from mass regeneration and size stratification. *Forest Ecology and Management*. 2019;441:176-181. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.044>
37. McDowell N. G., Allen C. D., Anderson-Teixeira K., Aukema B. H., Bond-Lamberty B., Chini L., Clark J. S., Dietze M., Grossiord C., Hanbury-Brown A., Hurr G. C., Jackson R. B., Johnson D. J., Kueppers L., Lichstein J. W., Ogle K., Poulter B., Pugh T. A. M., Seidl R., Turner M. G., Uriarte M., Walker A. P., Xu C. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*. 2020;368(6494):eaaz9463. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaz9463>
38. Ribeiro S., Cerveira A., Soares P., Fonseca T. Natural regeneration of maritime pine: A review of the influencing factors and proposals for management. *Forests*. 2022;13(3):386. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13030386>
39. Sandström J., Edman M., Jonsson B. G. Rocky pine forests in the High Coast Region in Sweden: Structure, dynamics and history. *Nature Conservation*. 2020; 38:101-130. DOI: <https://doi.org/10.3897/natureconservation.38.34870>
40. Song, L., Zhu, J., Li, M., Zhang J., Li D. Water use strategies of natural *Pinus sylvestris* var. *Mongolica* trees of different ages in Hulunbuir Sandy Land of Inner Mongolia, China, based on stable isotope analysis. *Trees*. 2018;32:1001–1011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-018-1691-2>
41. Taeger S., Zang C., Liesebach M., Schneck V., Menzel A. Impact of climate and drought events on the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) provenances. *Forest Ecology and Management*. 2013;307:30–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.06.053>

Сведения об авторах

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

Залесов Сергей Вениаминович – доктор с.-х. наук, заведующий кафедрой лесоводства, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3779-410X>, zalesovsv@m.usfeu.ru.

Information about the authors

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

Sergey V. Zalesov – Dr. Sci. (Agric.), Head of the Department of Forestry, Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt str., 37, Yekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3779-410X>, zalesovsv@m.usfeu.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/10>


УДК 630*181.311.3





Изучение взаимосвязей между параметрами рельефа местности и условиями произрастания насаждений в Воронежской области

Василий А. Славский¹✉, slavskiyva@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-6579-0344>

Дарья А. Литовченко¹, timashchuk90@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-2973-7447>

Алексей В. Мироненко¹, alexeymironenko66@gmail.com  <https://orcid.org/0009-0006-4668-8527>

Николай Н. Харченко¹, ecology@vgltu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7645-2642>

Евгений В. Титов¹, lesovod_taks@vgltu.ru  <https://orcid.org/0009-0003-9564-8183>

Зоран Говедар², zoran.govedar@sf.unibl.org  <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

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

²Государственный университет в Баня-Луке, Петра Бойовика 1А, Баня-Лука, Босния и Герцеговина

Современные исследования в лесохозяйственной отрасли все больше и больше ориентированы на цифровизацию и дистанционное зондирование Земли. Одним из перспективных направлений является формирование цифровой модели рельефа местности и его последующее изучение. В связи с этим целью работы является выявление взаимосвязей и установление зависимостей между параметрами рельефа и лесорастительными условиями для ускоренного определения ключевых лесоводственных и ландшафтных характеристик, в том числе с применением дистанционных методов. Объектами исследования являлись лесные насаждения, расположенные в Пригородном лесничестве Воронежской области. Формирование цифровой модели рельефа местности осуществлено с применением специализированного программного обеспечения. В ходе работы выявлены особенности рельефа местности, потенциально влияющие на формирование условий произрастания, составлены табличные аналитические материалы, позволяющие учитывать ландшафтные факторы на повыведельной основе. Получены данные о средней крутизне склонов, азимуте экспозиции склонов и высоте над уровнем моря каждого выдела в градусах и проанализированы их статистические параметры. Установлена корреляционная связь между лесотипологической составляющей, характеризующей влажность почвы и высотой участка над уровнем моря (0,23-0,29), а также крутизной склонов (0,30-0,32). Результаты исследований свидетельствуют о том, что подобная тенденция прослеживается даже при несущественных перепадах высот и крутизне склонов, характерных для Пригородного лесничества. Более влажные почвенные условия на территории исследуемого региона (А₃, В₃, С₃) расположены на микропонижениях или имеют близкое к поверхности залегание грунтовых вод. Выявленная закономерность позволит осуществить ускоренное определение условий произрастания дистанционным способом на основе показателей рельефа и рассматривать предложенные методы в числе потенциальных инструментов лесосчетных работ.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, высота местности, крутизна склонов, лесорастительные условия

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUR-2022-0009 «Разработка превентивной технологии контроля пожарной опасности лесов с использованием дистанционного зондирования на базе БПЛА»).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Изучение взаимосвязи между параметрами рельефа местности и условиями произрастания насаждений в Воронежской области / В. А. Славский, Д. А. Литовченко, А. В. Мироненко, Н. Н. Харченко, Е. В. Титов, З. Говедар // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 146–161. – Библиогр.: с. 157–160 (20 назв.) – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/10>.

Поступила 27.03.2023. Пересмотрена 12.04.2023. Принята 13.04.2023. Опубликовано онлайн 15.05.2023.

Article

Studying the relationship between terrain parameters and growth conditions in the Voronezh region

Vasiliy A. Slavskiy¹✉, slavskiyva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6579-0344>

Darya A. Litovchenko¹, timashchuk90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2973-7447>

Aleksey V. Mironenko¹, alexeymironenko66@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-4668-8527>

Nikolay N. Kharchenko¹, ecology@vgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7645-2642>

Evgeny V. Titov¹, lesovod_taks@vgtu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-9564-8183>

Zoran Govedar², zoran.govedar@sf.unibl.org, <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

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

²*State University in Banja Luka, Petra Bojovik 1A, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina*

Abstract

Modern research in the forestry industry is increasingly focused on digitalization and remote sensing. One of the promising areas is the formation of a digital terrain model and its subsequent study. In this regard, the purpose of the work is to identify relationships and establish dependencies between the parameters of the relief and forest conditions for the accelerated determination of key forestry and landscape characteristics, incl. using remote methods. The objects of the study were forest plantations located in the Prigorodnoye forestry of the Voronezh region. The formation of a digital terrain model was carried out on the basis of aviation and space monitoring materials using specialized software. In the course of the work, features of the terrain were identified that potentially affect the formation of growing conditions, and tabular analytical materials were compiled that allow taking into account landscape factors on a per-allocation basis. Data on the average slope steepness, slope exposure azimuth and height above sea level of each section in degrees were obtained and their statistical parameters were analyzed. A correlation was established between the forest typological component, which characterizes the moisture content of the soil and the height of the site above sea level (0.23-0.29), as well as the steepness of the slopes (0.30-0.32). The results of the research indicate that such a trend can be traced even with insignificant elevation changes and slope steepness, which are typical for the Prigorodnoye forestry. Wetter soil conditions in the territory of the study region (A3, B3, C3) are located on micro depressions or have groundwater close to the surface. The revealed pattern will make it possible to carry out an accelerated determination of growing conditions by a remote method based on terrain indicators and consider the proposed methods as potential tools for forest accounting.

Keywords: *digital elevation model, terrain height, slope steepness, type of forest conditions*

Funding: This research was funded the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUR-2022-0009) "Development of a preventive technology for forest fire hazard control using UAV-based remote sensing".

Acknowledgments: The authors thank the referees for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of Interest: The authors have declared no conflict of interest.

For citation: Slavskiy V.A., Litovchenko D.A., Mironenko A.V., Kharchenko N.N., Titov E.V., Govedar Z. (2023) Study of the relationship between the parameters of the terrain and the conditions for the growth of plantings in the Voronezh region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 146-161 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/10>.

Received 27.03.2023. Revised 12.04.2023. Accepted 13.04.2023. Published online 15.05.2023.

Введение

Одним из перспективных направлений является формирование цифровой модели рельефа местности и его последующее изучение в разрезе лесной типологии, проведения лесоучетных работ и дистанционного мониторинга [1, 2]. Современные материалы дистанционного зондирования и алгоритмы их обработки позволяют определить устойчивость природных комплексов по морфометрии рельефа [3].

Тип лесорастительных условий (ТЛУ) является базовым понятием в лесоведении, лесоводстве, инвентаризации лесов, лесной таксации и лесоустройстве. Согласно классификации, предложенной П.С. Погребняком [4] и в дальнейшем получившей широкое распространение в лесном хозяйстве, лесорастительные условия дифференцированы на 4 типа по богатству почвы и на 6 типов по увлажнению [5, 6].

Влияние характеристик поверхности рельефа на структуру и продуктивность лесных ландшафтов с использованием цифрового моделирования рельефа и ГИС-технологий изучалось многими исследователями [7-9]. Цифровая модель рельефа местности необходима не только для идентификации показателей насаждения по снимкам и упрощения их сопоставления с материалами наземной таксации [10]. Привязка к макро- и мезорельефу определяют характер почвенного покрова и условия произрастания, а также состав, структуру и функции лесных ландшафтов [11]. В ряде публикаций представлены результаты исследований, связанных с выявлением и оценкой взаимосвязей морфомет-

рических характеристик рельефа с характеристиками лесов [12, 13].

Известно, что определённые типы леса, как и типы лесорастительных условий очень тесно коррелируют с характеристиками рельефа [4]. Относительно макрорельефа, в Пригородном лесничестве Воронежской области, нагорные дубравы приурочены к высоким берегам рек, пойменные дубравы – к речной пойме, а островные боры приурочены берегам рек, с более бедными песчаными почвами. Однако в пределах выделенных популяций, зачастую наблюдается существенное разнообразие пород [14]. Следует отметить, что причины этого в настоящее время изучены недостаточно подробно.

В связи с этим целью работы является выявление взаимосвязей и установление зависимостей между параметрами рельефа и лесорастительными условиями для ускоренного определения ключевых лесоводственных и ландшафтных характеристик, в т.ч. с применением дистанционных методов.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Объектами исследования являлись лесные насаждения, расположенные в Пригородном лесничестве Воронежской области¹⁸. С учетом неоднородности ландшафта Пригородного лесничества, анализ рельефа проведен в разрезе участковых лесничеств – Правобережного (территории с преобла-

¹⁸Лесохозяйственный регламент Пригородного лесничества Воронежской области. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/550241765> (дата обращения: 04.11.2022).

данием лиственных пород) и Левобережного (территории с преобладанием хвойных пород) (рис. 1).

Сбор данных

Анализ показателей рельефа проведен для каждой отдельной типологической группы (боры, субори, судубравы, дубравы), выделяемой на основе классификации П.С. Погребняка, с учетом деления лесных условий произрастания насаждений по влажности и плодородию почвы [4, 6].



Рисунок 1. Схема расположения исследуемых объектов на территории Воронежской области
Figure 1. Scheme of the location of the studied objects on the territory of the Voronezh region

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

В задачи исследования входило сформировать цифровую модель местности (*digital terrain model*, DTM[15]) для оценки категорий земель и определения ключевых параметров рельефа, влияющих на условия произрастания насаждений.

Для анализа крупных территорий предложено построение повыведельной цифровой модели поверхности рельефа местности. Цифровая модель составлена на основе космических снимков SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), которые целесообразно применять для оперативного изучения макро- и мезорельефа на больших территориях[16]

Методика работ по обработке материалов включала в себя следующие этапы:

1) Загрузка и сшивка растровых SRTM-снимков заданной ширины охвата по координатам исследуемых территорий Пригородного лесничества Воронежской области.

2) Создание векторных слоёв границ участков лесничеств, квартальной сети и выделов с формированием атрибутивной таблицы, содержащей повыведельные таксационные характеристики.

3) Создание карт и 3D модели рельефа территории лесничества.

4) Определение параметров рельефа и их статистических характеристик для выделов Пригородного лесничества Воронежской области.

Загрузка SRTM снимков из открытого источника осуществлялась с помощью встроенного модуля QGIS – STRM-downloader 3.1.17. Охват исследуемой территории был задан от 50 до 55 ° северной широты и от 35 до 40 ° восточной долготы.

Работа по оцифровке границ лесничества, квартальной сети и выделов выполнялась в программе QGIS[17]. В качестве основы использовались геопривязанные и сшитые в программе EasyTrase растровые файлы лесоустроительных планшетов, а также таксационные описания выделов Пригородного лесничества. Заполнение атрибутивной таблицы векторных слоёв осуществлялось автоматически с использованием специально разработанного авторского программного обеспечения, позволяющего экспортировать данные из текстового формата таксационных описаний в формат DBF[18].

Анализ данных

Для анализа полученных результатов применялось лицензионное и авторское программное обеспечение [18]. С помощью программы STATISTICA, версия 13.0 (StatSoft, Россия, <https://statsoft.ru>) проведен статистический последовательный анализ [19] на основе рекомендаций Б.А. Доспехова¹⁹. Теснота связи между изучаемыми признаками оценивалась по шкале Чеддока [20].

Результаты и обсуждение

При создании цифровой модели рельефа территории Пригородного лесничества, для каждого участкового лесничества были получены векторные слои. Карты рельефа Пригородного лесничества Воронежской области создавались в про-

¹⁹Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Альянс, 2011; 547 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19517484>

грамме QGIS 3.12. Для растрового слоя SRTM назначался градиент «Spectral», который был инвертирован. Для отображения изолиний применялся растровый инструмент QGIS. Указывался угол отображения, наименование слоя, содержащего данные о высотах над уровнем моря, вертикальный масштаб, разрешение рисунка в пикселях и другие параметры. На рис. 2 показан результат построения 3D модели рельефа местности.

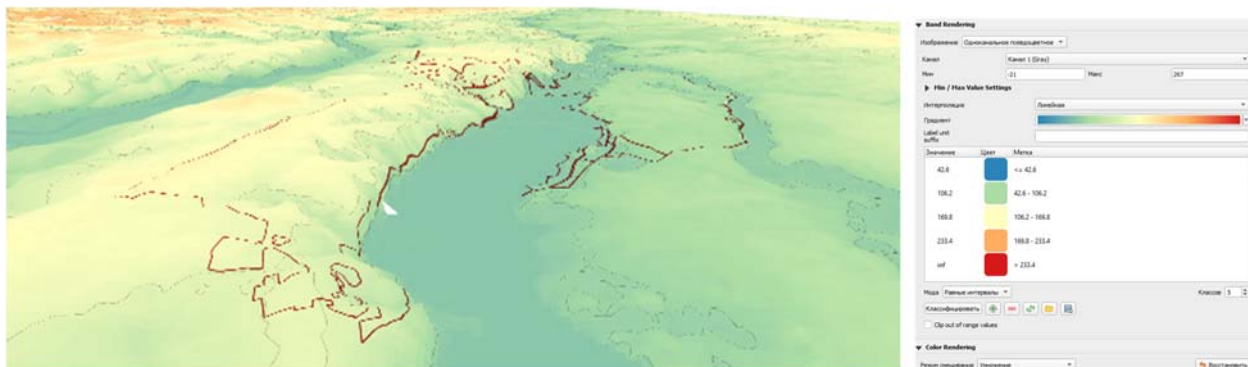


Рисунок 2. Построение 3D модели и поведельной карты рельефа местности

Figure 2. Building a 3D model and a sectional map of the terrain

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

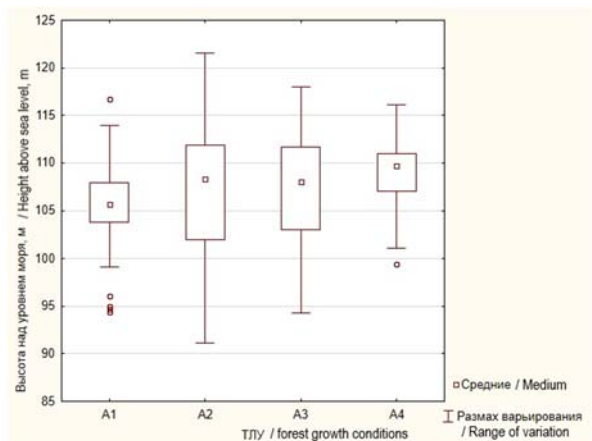


Рисунок 3. Диаграмма варьирования высоты над уровнем моря в борвых условиях (А)

Левобережного участкового лесничества

Figure 3. Diagram of variation in altitude above sea level in pine forest conditions (A)

of the Levoberezhnoye district forestry

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own measurements and calculations

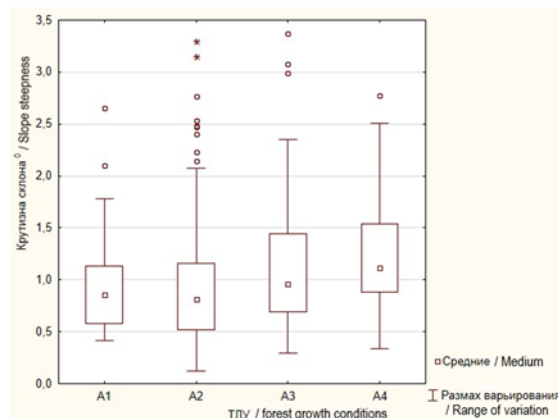


Рисунок 4. Диаграмма варьирования крутизны склона в борвых условиях (А)

Левобережного участкового лесничества

Figure 4. Diagram of variation of slope steepness in pine forest conditions (A)

of the Levoberezhnoye district forestry

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own measurements and calculations

На рис. 3 приведены средние показатели высоты над уровнем моря для ТЛУ А1-А4 Левобе-

режного участкового лесничества. Установлено, что типы лесорастительных условий, характерные для боров, не имеют тесной связи с высотой над уровнем моря – средние значения варьируют от 106 до 109 м н.у.м. и находятся в пределах статистической погрешности.

При установлении связи между встречаемостью разных по влажности почвы боровых условий и крутизне склона выявлено (рис. 4), что для наиболее влажных лесорастительных условий характерно увеличение крутизны склона. Прослеживается следующая тенденция: для А1 – среднее значение 0,81°, А2 – 0,75°, А3 – 0,93°, А4 – 1,14°. Незначительное снижение средней крутизны склона для А2 по сравнению с условиями А1 объясняется очень широкой территорией распространения данного ТЛУ – на графике в большом количестве видны статистические превышения, выходящие за пределы среднего размаха варьирования, выявленного на уровне вероятности события 0,95.

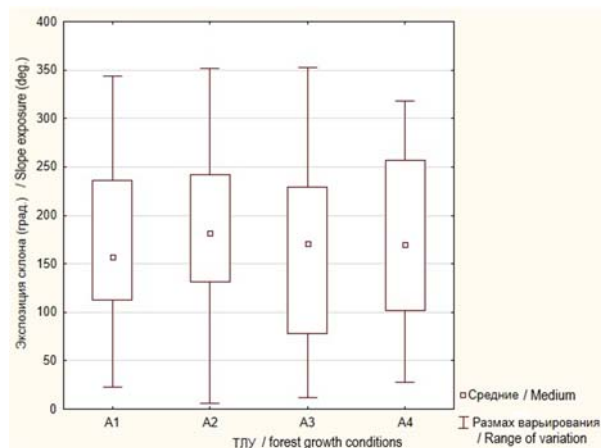


Рисунок 5. Диаграмма варьирования экспозиции склона в боровых условиях (А) Левобережного участкового лесничества

Figure 5. Slope exposure variation diagram in boron conditions (A) of the Levoberezhnoye district forestry

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own measurements and calculations

Анализируя средние статистические показатели по параметрам экспозиции склона в борах (А1-А4) выявлено (рис. 5), что наблюдается наибольший размах варьирования в типе лесорастительных условий – свежий бор (А2). Это связано с относительно комфортными условиями произрастания и высокой толерантностью произрастающих

в этих условиях древесных пород. Данный ТЛУ встречается на всей территории Пригородного лесничества без какой-либо привязки к экспозиции склона. Наименьшее варьирование по экспозиции склона наблюдается в сыром бору (А4), что объясняется узкой территориальной зональностью данного ТЛУ, а, следовательно, небольшой территорией встречаемости и специфическим набором растительности. Роль экспозиции склона в пределах рассматриваемых типов лесорастительных условий не имеет статистически значимой связи, полученной при уровне вероятности $F=0,95$.

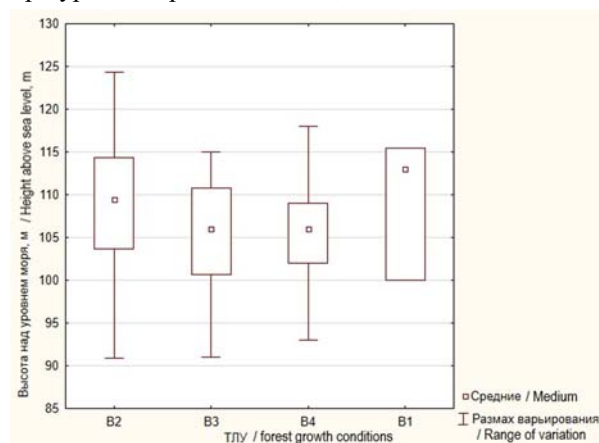


Рисунок 6. Диаграмма варьирования высоты над уровнем моря в суборях (В) на территории Левобережного участкового лесничества

Figure 6. Diagram of variation in height above sea level in suborya (B) on the territory of the Levoberezhnoye district forestry

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own measurements and calculations

При анализе встречаемости суборей (В1-В4) и выявления связи с высотой над уровнем моря выявлено, что сухая суборь (В1) имеет смещенный вариационный ряд и чаще всего встречается на микроповышениях. Средние статистические показатели для данного типа лесорастительных условий определены не достоверно из-за недостаточного объема выборки, что не позволяет использовать его для дальнейшего анализа.

Свежая суборь (В2) варьирует в большом диапазоне высот над уровнем моря от 91 до 124 м, т.к. встречается повсеместно и характеризуется наибольшим биоразнообразием. Средние значения высот над уровнем моря влажной (В3) и сырой (В4)

суборей сопоставимы друг с другом – около 106 м, но при этом условия В4 сосредоточены в достаточно узком высотном диапазоне – 68% территории находится на высоте от 102 до 108 м н.у.м.

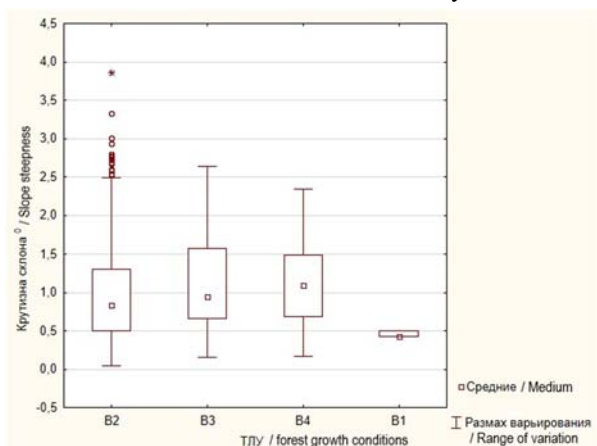


Рисунок 7. Диаграмма варьирования крутизны склона в суборях (В) на территории Левобережного участкового лесничества

Figure 7. Diagram of variation of the steepness of the slope in the subores (B) on the territory of the Levoberezhnoye district forestry

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own measurements and calculations

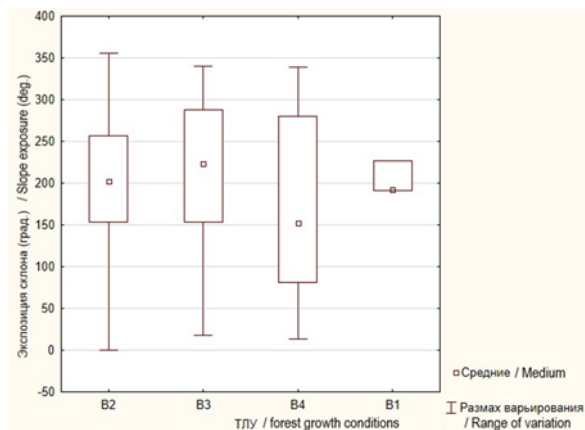


Рисунок 8. Диаграмма варьирования экспозиции склона в суборях (В) на территории Левобережного участкового лесничества

Figure 8. Diagram of variation of slope exposure in subores (B) on the territory of the Levoberezhnoye district forestry

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own measurements and calculations

При оценке связи между типом лесорастительных условий (суборь) и экспозицией склона

(рисунок 8) выявлено следующее: для В1 – среднее значение 190° , для В2 – 200° , для В3 – 225° , для В4 – 150° . Закономерно, что при увеличении влажности условий местопроизрастания средние значения крутизны склона увеличиваются, что особенно заметно в сырых суборях (В4). Наибольшее варьирование по экспозиции склона наблюдается в свежем бору, что объясняется очень широкой территорией его распространения в Левобережном участковом лесничестве. Связи экспозиции склона и рассматриваемых типов лесорастительных условий в пределах Пригородного лесничества не установлено.

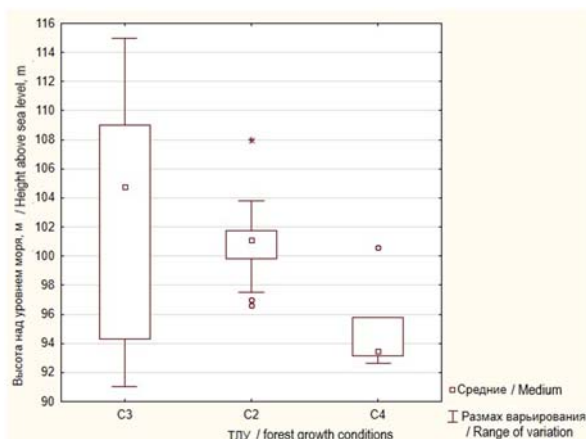


Рисунок 9. Диаграмма варьирования высоты над уровнем моря в судубравах (С) на территории Левобережного участкового лесничества

Figure 9. Diagram of variation in height above sea level in sudubraves (C) on the territory of the Levoberezhnoye district forestry

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own measurements and calculations

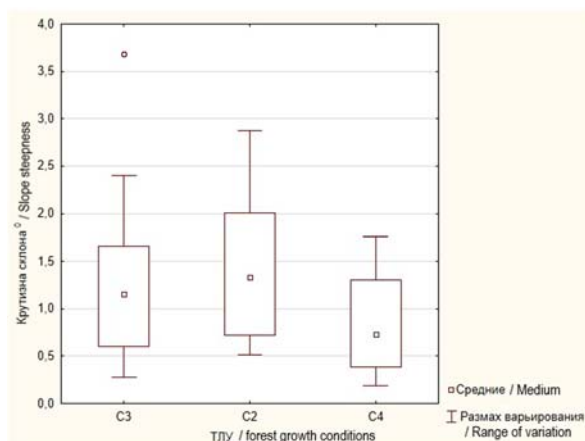


Рисунок 10. Диаграмма варьирования крутизны склона в судубравах (С) на территории Левобережного участкового лесничества

Figure 10. Diagram of variation of slope steepness in sudubraves (C) on the territory of the Levoberezhnoye district forestry

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own measurements and calculations

При анализе рис. 9 выявлено, что с увеличением высоты над уровнем моря границы между свежей и сырой судубравами сводятся к нулю. Среднее значение для C2 – 101м, для C4 – 93м.

Диаграмма варьирования крутизны склона по судубравам (рисунок 10) показывает, что наименьшая средняя величина характерна для сырой субдубравы (0,6°), т.к. сырая судубрава (C4) в основном встречается в низинах и не имеет резких перепадов рельефа. Наибольший размах варьирования и более высокие средние значения крутизна склона приобретает в свежих судубравах (C2). Это связано как с наибольшей территориальной встречаемостью, так и с наиболее богатым видовым разнообразием данного ТЛУ. Прослеживается следующая тенденция: для C2 – среднее значение 1,4°, C3 – 1,1°, C4 – 0,6°.

Сухие лесорастительные условия характеризуются небольшим диапазоном высот над уровнем моря, что является очевидным в разрезе их встречаемости. Наибольший размах варьирования по крутизне склона наблюдается в свежих и сырых борах (A2, A3). Но при этом сырая дубрава и болота также встречаются при крутизне склона в диапазоне от 0,1 до 4,4°. Обобщив результаты, можно сделать вывод о практически полном отсутствии влияния экспозиции склонов на разновидность ТЛУ в Левобережном участковом лесничестве. Крутизна склона и высота над уровнем моря имеют слабую корреляционную связь с принадлежностью территории к лесорастительным условиям, однако эта связь прослеживается повсеместно.

Средние статистические показатели, характеризующие компоненты рельефа и корреляционная связь между ними приведена в табл. 1.

Таблица 1

Корреляционная матрица ТЛУ, характерных для сосновых насаждений и показателей рельефа в Левобережном участковом лесничестве

Table 1

Correlation matrix of FGC characteristic for pine plantations and relief indicators in the Levoberezhnoye district forestry

Переменная variable	Статист. показатели statistics		Коэффициент корреляции correlation coefficient			
	среднее значение average value	основное отклонение deviation	ТЛУ FGC	высота над уровнем моря, м height above sea level, m	крутизна склона slope steepness (deg.)	экспозиция склона, град. slope exposure (deg.)
ТЛУ FGC (A1-A4)			1,000	0,226	0,295	0,051
Высота над уровнем моря, м height above sea level, m	98,95	4,43	0,226	1,000	0,345	-0,119
Крутизна склона, град. slope steepness(deg.)	1,167	0,635	0,295	0,345	1,000	0,322
Экспозиция склона, град. slope exposure (deg.)	206,83	83,73	0,051	-0,119	0,322	1,000

Источник: собственные измерения и вычисления авторов
Source: own measurements and calculations

В сосновых насаждениях, расположенных на территории Левобережного участкового лесничества, выявлена наибольшая теснота связи между типами лесорастительных условий и крутизной склона (около 0,3). Корреляция между ТЛУ и экспозицией склона не выявлена. Взаимосвязи влажности почвы в сосновых борах и суббоях высотой над уровнем моря в Левобережном участковом лесничестве приведены на рис. 11 и 12.

Следует отметить, что несмотря на несущественные абсолютные перепады высот на территории Левобережного участкового лесничества, мезорельеф позволяет провести дифференциацию лесорастительных условий по влажности почвы – боровой ряд сосновых насаждений зачастую «привязан» к положению в рельефе: А1 (сухой бор) – вершины холмов; А2 (свежий бор) – склоны холмов; А3 (влажный бор) и А4 – нижние части склонов, основания холмов.

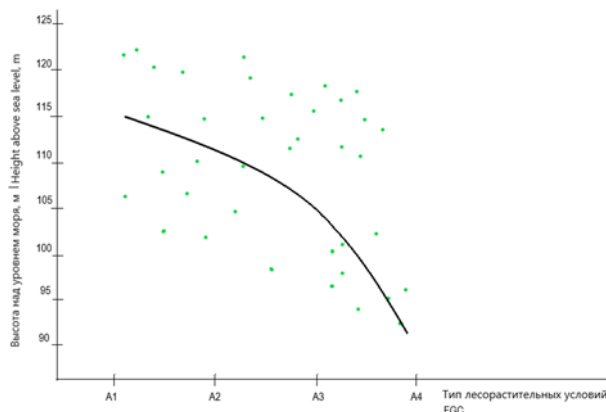


Рисунок 11. Взаимосвязи влажности почвы в сосновых борах (А) и высотой над уровнем моря в Левобережном участковом лесничестве
 Figure 11. Dependence of soil moisture in pine forests (A) and height above sea level in the Levoberezhnoye district forestry

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

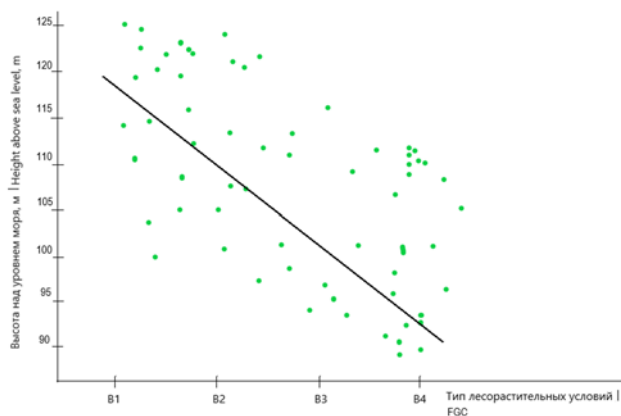


Рисунок 12. Взаимосвязи влажности почвы в основных суборах (В) и высотой над уровнем моря в Левобережном участковом лесничестве
Figure 12. Dependence of soil moisture in pine suboria (В) and height above sea level in the Levoberezhnoye district forestry

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

На диаграммах (рис. 11 и 12) показано, что наблюдается слабая (иногда умеренная) теснота связи между высотой над уровнем моря и типами лесорастительных условий – от 0,22 до 0,34. Данная зависимость прослеживается, несмотря на минимальные высотные перепады, что является основанием для полноценного использования полученных закономерностей на более рельефных территориях. Подобная тенденция сохраняется как в борах, так и суборах. Выявленная закономерность позволит осуществить ускоренное определение условий

произрастания дистанционным способом на основе показателей рельефа местности и рассматривать предложенные методы в числе потенциальных инструментов лесоучетных работ. При этом требуется дополнительная апробация результатов исследований и формирование обширной базы данных.

В Правобережном участковом лесничестве преобладают дубравы, а сама территория находится на больших относительных высотах, в связи с чем характеристики рельефа и лесорастительных условий проанализированы отдельно. Повсеместно наблюдается неравномерность высот над уровнем моря, крутизны и экспозиции склона в разрезе типов лесорастительных условий. Наибольший размах варьирования выявлен в свежей судубраве (С2) по крутизне склона (до 12,8°) и экспозицией склона (до 359°). Сырые условия влажности почвы отличаются небольшим варьированием по крутизне склона и высотой над уровнем моря. Болотистые участки (сырые типы лесорастительных условий) характеризуются небольшим варьированием по экспозиции склона. Следует отметить, что свежие лесорастительные условия (А2, В2, С2 и Д2) могут быть расположены на максимальной высоте н.у.м. Сырые условия (С4 и Д4/Д5) располагаются в низинах и микропонижениях, что обуславливает меньшую высоту н.у.м.

Статистические показатели, характеризующие компоненты рельефа отражены на рисунке 13, а корреляционная связь между ними и влажностью почвы в дубравах приведена в табл. 2.

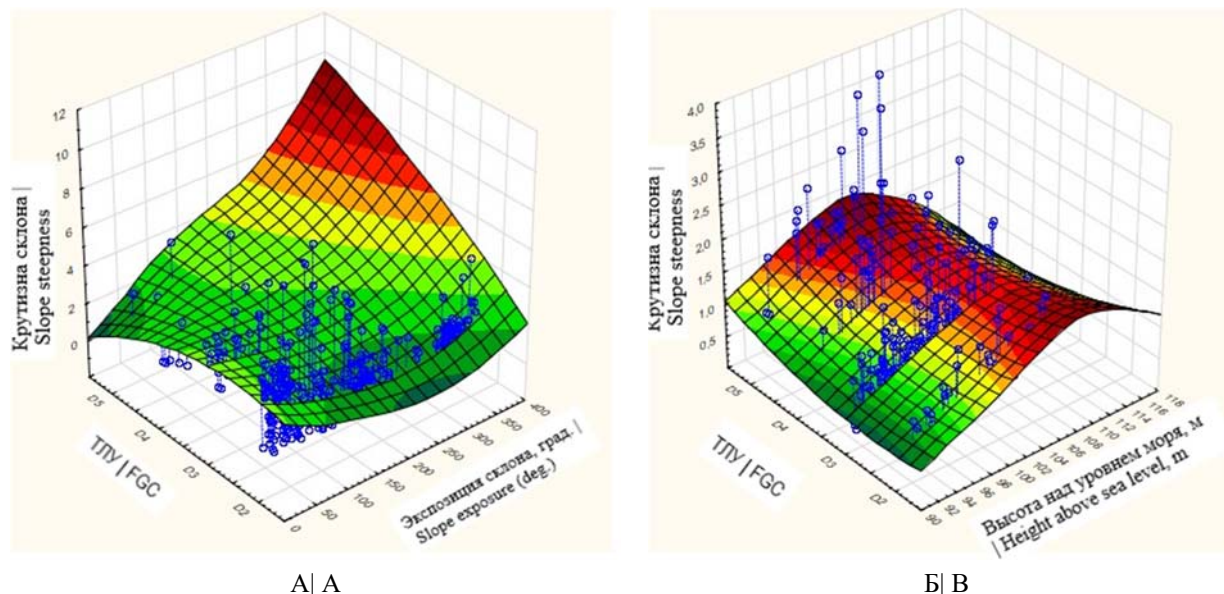


Рисунок 13. Сплайн влажности почвы в дубравах и крутизна склона с экспозицией склона (А) и высотой над уровнем моря (Б)
 Figure 13. Spline of soil moisture in oak forests and slope steepness with slope exposure (A) and height above sea level (B)

Источник: собственная композиция авторов
 Source: author's composition

Корреляционная матрица ТЛУ, характерных для дубовых насаждений и показателей рельефа в Правобережном участковом лесничестве

Таблица 2

Table 2

Correlation matrix of FGC characteristic for oak plantations and relief indicators in Pravoberezhny district forestry

Переменная variable	Статистические показатели statistics		Коэффициент корреляции correlation coefficient			
	среднее значение average value	основное отклонение deviation	ТЛУ FGC	высота над уровнем моря, м height above sea level, m	крутизна склона slope steepness (deg.)	экспозиция склона, град. slope exposure (deg.)
ТЛУ FGC (Д2-Д5)			1,000	0,286	0,191	0,329
Высота над уровнем моря, м height above sea level, m	147,95	18,43	0,286	1,000	-0,621	0,374
Крутизна склона, град. slope steepness (deg.)	2,32	1,61	0,191	-0,621	1,000	-0,214
Экспозиция склона, град. slope exposure (deg.)	142,86	95,52	0,329	0,374	-0,214	1,000

Источник: собственные измерения и вычисления авторов
 Source: own measurements and calculations

Теснота связи, установленная между крутизной склона и типом лесорастительных условий, составила 0,19. Посредственное влияние данного показателя рельефа на влажность почвы в дубравах Правобережного участкового лесничества объясняется относительно ровной поверхностью исследуемой территории – крутизна склонов не превышает 5 град. Корреляция между ТЛУ и экспозицией склона

составила 0,32, при среднем показателе 142 град. Следовательно, дубравы преимущественно произрастают на ЮВ и Ю склонах.

Заключение

Мезорельеф позволяет провести более детальную дифференциацию – боровой ряд сосны по увлажнению зачастую «привязан» к положению в

рельефе: А₁ (сухой бор) – вершины холмов (тип леса – сосняк злаково-лишайниковый); А₂ (свежий бор) – склоны холмов (тип леса – сосняк травяной); А₃ (влажный бор) – нижние части склонов, основания холмов (тип леса – сосняк мшистый). Такая же закономерность характерна и для других типов леса, расположенных в сухих условиях. Результаты исследований свидетельствуют о том, что подобная тенденция прослеживается даже при несущественных перепадах высот и крутизне склонов, характерных для Пригородного лесничества.

В наших исследованиях подтверждена закономерность, при которой отмечается динамика месторасположения относительно рельефа в связи с условиями произрастания – в сухих типах лесорас-

тительных условий (А₁, В₁) выявлена максимальная высота над уровнем моря. В свежих лесорастительных условиях (А₂, В₂, С₂) наблюдается аналогичная зависимость и расположение лесных участков. Выявлено, что более влажные почвенные условия на территории исследуемого региона (А₃, В₃, С₃) расположены на микропонижениях или имеют близкое к поверхности залегание грунтовых вод.

Выявленная закономерность позволит осуществить ускоренное определение условий произрастания дистанционным способом на основе показателей рельефа местности и рассматривать предложенные методы в числе потенциальных инструментов лесоучетных работ.

Список литературы

1. Сахабиев И. А., Рязанов С. С., Кольцова Т. Г., Григорьян Б. Р. Выбор метода геостатистической интерполяции свойств почв государственных сортоиспытательных участков при использовании параметров цифровой модели рельефа. Почвоведение, 2018. № 3, с. 259–273. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030012>.
2. Socha J., Pierzchalski M., Bałazy R., Ciesielski M., Modelling top height growth and site index using repeated laser scanning data. Forest Ecology and Management, 2017, Vol. 406, pp. 307–317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.039>.
3. Верозуб Н.В., Проскурин В.С., Махмудов Р.К. Методика определения ландшафтного потенциала для развития рекреационного природопользования (на примере городского округа города-курорта Кисловодска) Геоинформационное и картографическое обеспечение экологических, экономических и социальных аспектов устойчивого развития территорий, 2020. С. 126-140. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-1-27-126-140>.
4. Slavskiy V., Litovchenko D., Matveev S., Sheshnitsan S., Larionov M. Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain. Land. 2023, 12, 103. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12010103>.
5. Мигунова Е.С. Лесная типология Г.Ф. Морозова – А.А. Крюденера – П.С. Погребняка – теоретическая основа лесоводства // Лесной вестник. -2017. - Т. 21. - № 5. - С. 52-63. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2017-5-52-63>.
6. Мигунова, Е. С. Лесная типология и ботаника. Экологическая оценка факторов природной среды / Е.С. Мигунова // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 65-81. – DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-4-65-81>.
7. Magruder L., Neuenschwander A., Klotz B. Digital terrain model elevation corrections using space-based imagery and ICESat-2 laser altimetry. Remote Sensing of Environment. 2021; 264: 112621. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112621>.
8. Meixner J., Grimmer J. C., Becker A., Schille., Kohl T. Comparison of different digital elevation models and satellite imagery for lineament analysis: Implications for identification and spatial arrangement of fault zones in crystalline basement rocks of the southern Black Forest (Germany). Journal of Structural Geology. 2018; 108: 256-268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.11.006>.
9. Черниковский Д.М. Оценка связей морфометрических характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов на основе цифровых моделей рельефа ASTER и SRTM // Сибирский лесной журнал, 2017. - № 3. – С. 28–39. DOI: <https://doi.org/10.15372/SJFS20170303>.

10. Алексеев А.С., Черниховский Д.М. Анализ связей структуры и продуктивности лесов с морфометрическими характеристиками рельефа на примере ландшафтов Ленинградской области // Лесоведение. 2020. - № 2. –С. 99-114. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0024114820020035>.
11. Jucker T., Bongalov B., Burslem D., Nilus R., Dalponte M., Lewis S., Phillips O., Qie L., Coomes D. Topography shapes the structure, composition and function of tropical forest landscapes // Ecology Letters. 2018. V. 21. P. 989–1000. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12964>
12. Сочилова Е.Н., Сурков Н.В., Ершов Д.В., Егоров В.А., Барталев С.С., Барталев С.А. Картографирование классов бонитета лесов Приморского края на основе спутниковых изображений и данных о характеристиках рельефа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. №5. С. 96–109. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-96-109>.
13. Черниховский Д.М. Использование автоматической классификации рельефа Ивахаши и Пайка для оценки количественных и качественных характеристик лесов на основе моделей высот рельефа и поверхности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 223. С. 100–126. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.223.100-126>.
14. Славский В.А., Матвеев С.М. Некоторые аспекты закладки пробных площадей при проведении Государственной инвентаризации лесов // Лесотехнический журнал. 2021. Т. 11. - № 1 (41). - С. 56-63. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.1/5>.
15. Hojo, A. Synthesis of L-Band SAR and forest heights derived from TanDEM-X DEM and 3 digital terrain models for biomass mapping / A. Hojo, K. Takagi, R. Avtar et al. Remote Sensing. 2020; 12 (3): 349. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12030349>.
16. Maltamo M., Rätty J., Korhonen L., Kotivuori E., Kukkonen M., Peltola H., Kangas J., Packalen P. Prediction of forest canopy fuel parameters in managed boreal forests using multispectral and unispectral airborne laser scanning data and aerial images // Eur. J. Remote Sens – 2020. – P.25-28. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1816142>
17. Hernández, O. and Peralta, T. Functional Relationships of a Geospatial System for Reforestation of a Territory Using Geographic Information Systems. OpenAccessLibraryJournal. 2019; 6: 1-5. DOI: <https://doi.org/10.4236/oalib.1105193>.
18. Мироненко А. В., Матвеев С. М., Славский В. А., Водолажский А. Н. Программа для актуализации характеристик лесного фонда лесничеств на основе обработки сведений о проведенных лесохозяйственных мероприятиях // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022681571, 15.11.2022. Заявка № 2022681568 от 15.11.2022. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49780884>.
19. Шевелина И. В., Нуриев Д. Н. Статистическая обработка лесоводственно-таксационной информации в среде STATISTICA. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. – 112 с. ISBN 978-5-94984-840-1. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777>.
20. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kentbayeva B.A., Kentbayev Y.Zh., Mamonov E.I., Zapolnov V.E. Growth of seedlings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) in the conditions of introduction to the Nizhny Novgorod region. Izvestia SPbLTA. 2022; 238: 67-87. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.67-87>.

References

1. Sakhbiyev I. A., Ryazanov S. S., Kol'tsova T. G., Grigor'yan B. R. Vybor metoda geostatisticheskoy interpolatsii svoystv pochv gosudarstvennykh sortoispytatel'nykh uchastkov pri ispol'zovanii parametrov tsifrovoy modeli rel'yefa [Choice of the method of geostatistical interpolation of soil properties of state variety-testing plots using the parameters of a digital elevation model]. Pochvovedeniye, 2018, № 3, s. 259–273. (in Russian). DOI: 10.7868/S0032180X18030012
2. Socha J., Pierzchalski M., Bałazy R., Ciesielski M., Modelling top height growth and site index using repeated laser scanning data. Forest Ecology and Management, 2017, Vol. 406, pp. 307–317. DOI:10.1016/j.foreco.2017.09.039

3. Verozub N.V., Proskurin V.S., Makhmudov R.K. Metodika opredeleniya landshaftnogo potentsiala dlya razvitiya rekreatsiionnogo prirodopol'zovaniya (na primere gorodskogo okruga goroda-kurorta Kislovodsk) [Methodology for determining the landscape potential for the development of recreational nature management (on the example of the urban district of the resort city of Kislovodsk)] *Geoinformatsionnoye i kartograficheskoye obespecheniye ekologicheskikh, ekonomicheskikh i sotsial'nykh aspektov ustoychivogo razvitiya territoriy*, 2020 s. 126-140. (in Russian).DOI:10.35595/2414-9179-2021-1-27-126-140
4. Slavskiy V., Litovchenko D., Matveev S., Sheshnitsan S., Larionov M. Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain Land 2023, 12, 103. <https://doi.org/10.3390/land12010103>
5. Migunova E.S. Lesnaya tipologiya G.F. Morozova – A.A. Kryudenera – P.S. Pogrebnyaka – teoreticheskaya osnova lesovodstva [Forest typology G.F. Morozov - A.A. Krudener - P.S. Pogrebnyak - the theoretical basis of forestry] // *Lesnoy vestnik*. [Forest Bulletin]. – 2017. - T. 21. - № 5. - S. 52-63. (in Russian).DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-52-63
6. Migunova E.S. Lesnaya tipologiya i botanika. Ekologicheskaya ocenka faktorov prirodnoy sredy [Forest typology and botany. Ecological assessment of environmental factors] // *Lesnoy vestnik*. [Forestry Bulletin] –2020. – Vol. 24, no. 4. – pp. 65-81. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-4-65-81> (in Russian).
7. Magruder L., Neuenschwander A., Klotz B. Digital terrain model elevation corrections using space-based imagery and ICESat-2 laser altimetry / *Remote Sensing of Environment*. – V. 264, Oct. 2021, 112621. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112621>
8. Meixner J., Grimmer J.C., Becker A., Schill E., Kohl T. Comparison of different digital elevation models and satellite imagery for lineament analysis: Implications for identification and spatial arrangement of fault zones in crystalline basement rocks of the southern Black Forest (Germany) / *Journal of Structural Geology*. – V. 108, March 2018. – P. 256-268. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.11.006>
9. Chernikhovskiy D.M. Otsenka svyazey morfometricheskikh kharakteristik rel'yefa s kolichestvennymi i kachestvennymi kharakteristikami lesov na osnove tsifrovyykh modeley rel'yefa ASTER i SRTM [Evaluation of the relationship between the morphometric characteristics of the relief and the quantitative and qualitative characteristics of forests based on digital elevation models ASTER and SRTM] // *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Forest Journal], 2017. - № 3. – S. 28–39. (in Russian).DOI: 10.15372/SJFS20170303
10. Alekseyev A.S., Chernikhovskiy D.M. Analiz svyazey struktury i produktivnosti lesov s morfometricheskimi kharakteristikami rel'yefa na primere landshaftov Leningradskoy oblasti [Analysis of the links between the structure and productivity of forests and morphometric characteristics of the relief on the example of the landscapes of the Leningrad Region] // *Lesovedeniye* [Forestry]. 2020. - № 2. –S. 99-114.(in Russian). DOI: 10.31857/S00241148200200355.
11. Jucker T., Bongalov B., Burslem D., Nilus R., Dalponte M., Lewis S., Phillips O., Qie L., Coomes D. Topography shapes the structure, composition and function of tropical forest landscapes // *Ecology Letters*. 2018. V. 21. P. 989–1000. <https://doi.org/10.1111/ele.12964>
12. Sochilova Ye. N., Surkov N. V., Yershov D. V., Yegorov V. A., Bartalev S.S., Bartalev S. A. Kartografirovaniye klassov boniteta lesov Primorskogo kraja na osnove sputnikovykh izobrazheniy i dannykh o kharakteristikakh rel'yefa [Mapping of forest quality classes of Primorsky Krai based on satellite images and data on the characteristics of the relief] / *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. T. 15. №5. S. 96–109. (in Russian).DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-96-109
13. Chernikhovskiy D.M. Ispol'zovaniye avtomaticheskoy klassifikatsii rel'yefa Ivahashi i Payka dlya otsenki kolichestvennykh i kachestvennykh kharakteristik lesov na osnove modeley vysot rel'yefa i poverkhnosti [The use of automatic relief classification by Iwahashi and Paik to assess the quantitative and qualitative characteristics of forests based on models of relief and surface heights] // *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*. 2018. Vyp. 223. S. 100–126. (in Russian). DOI: 10.21266/2079-4304.2018.223.100-126

14. Slavskiy V.A., Matveyev S.M. Nekotoryye aspekty zakladki probnykh ploshchadey pri provedenii Gosudarstvennoy inventarizatsii lesov. [Some Aspects of Establishing Trial Plots During the State Forest Inventory]-Lesotekhnicheskii zhurnal[Forestry Engineering journal], 2021. - T. 11. - № 1 (41). - S. 56-63. (in Russian).DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/5
15. Hojo, A. Synthesis of L-Band SAR and forest heights derived from TanDEM-X DEM and 3 digital terrain models for biomass mapping / A. Hojo, K. Takagi, R. Avtar et al. Remote Sensing. 2020; 12 (3): 349. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12030349>.
16. Maltamo M., Rätty J., Korhonen L., Kotivuori E., Kukkonen M., Peltola H., Kangas J., Packalen P. Prediction of forest canopy fuel parameters in managed boreal forests using multispectral and unispectral airborne laser scanning data and aerial images // Eur. J. Remote Sens – 2020. – P.25-28. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1816142>
17. Hernández, O. and Peralta, T. Functional Relationships of a Geospatial System for Reforestation of a Territory Using Geographic Information Systems. Open Access Library Journal (2019), 6, 1-5. doi: 10.4236/oalib.1105193.
18. Mironenko A. V., Matveev S. M., Slavskiy V. A., Vodolazhskiy A. N. Programma dlya aktualizatsii kharakteristik lesnogo fonda lesnichestv na osnove obrabotki svedeniy o provedennykh lesokhozyaystvennykh mero-priyatiyakh [A program for updating the characteristics of the forest fund of forestries based on the processing of information about the forestry activities carried out] // Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM [Certificate of registration of the computer program] 2022681571, 15.11.2022. Zayavka № 2022681568 ot 15.11.2022. (in Russian). Rezhim dostupa:<https://elibrary.ru/item.asp?id=49780884>
19. Shevelina I. V., Nureyev D. N. Statisticheskaya obrabotka lesovodstvenno-taksatsionnoy informatsii v srede STATISTICA [Statistical processing of forestry and taxation information in the STATISTICA environment]. Yekaterinburg: UGLTU, 2022. - 112 p. ISBN 978-5-94984-840-1 Rezhim dostupa:<https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777>
20. Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kentbayeva B.A., Kentbayev Y.Zh., Mamonov E.I., Zapolnov V.E. Growth of seedlings of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana*) in the conditions of introduction to the Nizhny Novgorod region. Izvestia SPbLTA. 2022; 238: 67-87. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.67-87>(in Russian).

Сведения об авторах

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

Литовченко Дарья Андреевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; e-mail: timashchuk90@mail.ru

Мироненко Алексей Викторович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; e-mail: alexeymironenko66@gmail.com

Харченко Николай Николаевич - доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии, защиты леса и лесного охотоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: forest.vrn@gmail.com

Титов Евгений Васильевич – профессор кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор сельскохозяйственных наук, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: lesovod_taks@vgltu.ru

Зоран Говедар – профессор Факультета лесного хозяйства Университета Банья Лука, доктор наук, Банья Лука, Босния и Герцеговина, e-mail: zoran.govedar@sf.unibl.org

Information about the authors

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

Darya A. Litovchenko – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: timashchuk90@mail.ru;

Aleksey V. Mironenko – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: alexeymironenko66@gmail.com;

Nikolay N. Kharchenko – Dr. Sci. (Bio.), Professor, Head of the Department of Ecology, Forest Protection and Forest Hunting Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: forest.vrn@gmail.com;

Evgeny V. Titov – Professor of forestry, forest taxation and forest management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, DSc (Agricultural sciences), Voronezh, Russian Federation; 394087, e-mail: lesovod_taks@vgltu.ru

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

✉ Для контактов/Corresponding author


Оригинальная статья


DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>


УДК 630*31 : 169.113





Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного сцепного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом

Вадим О. Никонов¹✉, 8888nike8888@mail.ru  0000-0002-7380-9180

Валерий И. Посметьев¹, posmetyev@mail.ru  0000-0001-9878-7451

Владимир А. Зеликов¹, zelikov-vrn@mail.ru  0000-0003-2317-9413

Виктор В. Посметьев¹, victorvpo@mail.ru  0000-0001-6622-5358

Алексей С. Чуйков², offlex88@belstu.by  0000-0002-6923-7212

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

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

В данной статье решается проблема повышения эффективности функционирования лесовозных автопоездов в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог. Опыт эксплуатации автопоездов по таким лесовозным дорогам показывает, что на этих дорогах транспортно-эксплуатационные качества лесовозных автопоездов являются низкими. Обоснована актуальность научного направления, нацеленная на достижение топливной экономичности лесовозных автопоездов и повышение, таким образом, эффективности и конкурентоспособности лесозаготовительных предприятий. Представлен анализ работ зарубежных ученых, который позволил выделить существенные факторы, от которых во многом зависит эффективность процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. Предложена перспективная конструкция сцепного устройства, позволяющая преобразовывать и полезно использовать кинетическую энергию массы прицепа с лесоматериалами, которая возникает в процессе движения автопоезда по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам в неустановившихся и переходных режимах движения. Исследование базировалось на математическом и имитационном моделировании, численных методах, а также современных методах получения и обработки информации при компьютерной поддержке. Разработаны математическая модель и компьютерная программа движения лесовозного автопоезда в изменяющихся дорожных условиях. Компьютерное моделирование позволило осуществить предварительную оценку работоспособности предлагаемого пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами за счет выявления и анализа зависимостей, характеризующих изменение исследуемых показателей эффективности от условий движения автопоезда и конструктивных параметров устройства. Установлено, что сцепное устройство в процессе движения лесовозного автопоезда в сложных дорожных условиях со скоростью 30 кмч⁻¹ дает возможность рекуперировать до 7 кВт, при этом, значение продольного ускорения прицепного звена относительно лесовозного автомобиля не превышает 0,83 м с⁻². Определено, что значение оптимального диаметра рекуперативного гидроцилиндра составляет 80-100 мм, а оптимального хода поршня 83-100 мм. При этом средняя мощность, рекуперированная устройством, составит не менее 7 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа составит не более 0,8 м с⁻². Выявлено, что разработанная система рекуперации остается эффективной в широком диапазоне высот неровностей 0,2-0,4 м, обеспечивая рекуперированную мощность 2,3-19,7 кВт соответственно при приемлемом значении среднего продольного ускорения 0,3-2,2 м с⁻². Полученные результаты будут использованы в качестве рекомендаций для конструкторов с целью доработки предлагаемого сцепного устройства на стадии проектирования.

Ключевые слова: оптимизация, картограмма, сцепное устройство, лесовозный автомобиль, рекуперативная мощность, прицеп, расход топлива, лесовозная дорога, эффективность, вывозка лесоматериалов

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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


Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного сцепного устройства, установленного в лесовозном автомобиле с прицепом / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, В. А. Зеликов, В. В. Посметьев, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 162–179. – Библиогр.: с. 176–178 (20 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>.


Поступила 05.12.2022. *Пересмотрена* 04.03.2023. *Принята* 05.03.2023. *Опубликована онлайн* 15.05.2023


Article


Optimization of the design parameters of the regenerative hitch installed in a logging vehicle with a trailer

Vadim O. Nikonov¹✉, 8888nike8888@mail.ru,  0000-0002-7380-9180

Valerii I. Posmetev¹, posmetev@mail.ru,  0000-0001-9878-7451

Vladimir A. Zelikov¹, zelikov-vm@mail.ru,  0000-0003-2317-9413

Viktor V. Posmetev¹, victorvp@mail.ru,  0000-0001-6622-5358

Alexey S. Chuikov², offlex88@belstu.by,  0000-0002-6923-7212

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

²Belarussian State Technological University, 13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus

Abstract

This article solves the problem of increasing the efficiency of the functioning of logging road trains in conditions of insufficiently equipped logging roads. Experience in the operation of road trains on such logging roads shows that on these roads the transport and operational qualities of logging road trains are low. The relevance of the scientific direction, aimed at achieving the fuel efficiency of logging road trains and thus increasing the efficiency and competitiveness of logging enterprises, is substantiated. An analysis of the work of foreign scientists is presented, which made it possible to identify significant factors that largely determine the efficiency of the process of hauling timber by timber road trains. A promising design of the coupling device is proposed, which allows converting and usefully using the kinetic energy of the mass of the trailer with timber, which occurs during the movement of a road train along insufficiently equipped logging roads in unsteady and transient traffic modes. The study was based on mathematical and simulation modeling, numerical methods, as well as modern methods for obtaining and processing information with computer support. A mathematical model and a computer program for the movement of a timber road train under changing road conditions have been developed. Computer simulation made it possible to carry out a preliminary assessment of the performance of the proposed pneumohydraulic coupling device with recuperative and damper mechanisms by identifying and analyzing dependencies characterizing the change in the studied performance indicators on the driving conditions of the road train and the design parameters of the device. It has been established that the coupling device during the movement of a logging road train in difficult road conditions at a speed of 30 km/h makes it possible to recuperate up to 7 kW, while the value of the

longitudinal acceleration of the trailer link relative to the logging vehicle does not exceed 0.83 m/s^2 . It is determined that the value of the optimal diameter of the recuperative hydraulic cylinder is $80 \dots 100 \text{ mm}$, and the optimal piston stroke is $83 \dots 100 \text{ mm}$. In this case, the average power recuperated by the device will be at least 7 kW , and the average longitudinal acceleration of the trailer will be no more than 0.8 m/s^2 . It was found that the developed recuperation system remains effective in a wide range of roughness heights of $0.2 \dots 0.4 \text{ m}$, providing a recuperated power of $2.3 \dots 19.7 \text{ kW}$, respectively, with an acceptable average longitudinal acceleration of $0.3 \dots 2.2 \text{ m/s}^2$. The results obtained will be used as recommendations for designers to refine the proposed coupling device at the design stage.

Keywords: *optimization, cartogram, hitch, logging vehicle, regenerative power, trailer, fuel consumption, logging road, efficiency, timber hauling*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: author(s) thank(s) the reviewers for their contribution to the peer review.

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

For citation: Nikonov V. O., Posmetev V. I., Zelikov V. A., Posmetev V. V., Chuikov A. S. (2023) Optimization of the design parameters of the regenerative hitch installed in a logging vehicle with a trailer. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal]*, Vol. 13, No. 1 (49), pp. 162-179 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/11>.

Received 05.12.2023 *Revised* 04.03.2023 *Accepted* 05.03.2023 *Published online* 15.05.2023

Введение

Транспорт играет огромную роль в функционировании лесной промышленности. Вопросы, связанные с вывозкой лесоматериалов лесовозными автопоездами очень важны для лесозаготовительных предприятий. Лесовозные автопоезда выполняют функцию связующего звена между лесозаготовительными предприятиями и потребителями лесоматериалов. Вывозка лесоматериалов является наиболее дорогостоящей частью процесса заготовки древесины, от которой зависит эффективность и развитие лесозаготовительных предприятий. Известно, что стоимость вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами может составлять почти половину конечной стоимости доставляемой потребителям древесины [1]. С целью повышения своей эффективности и конкурентоспособности, лесозаготовительные предприятия стараются снижать транспортные расходы. Расход топлива является одним из основных факторов увеличивающих транспортные расходы в сфере вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. До 35 % общих транспортных расходов связаны с потреблением топлива. Кроме этого, расход топлива лесовозными автопоездами при их движении по необустроенным лесовозным дорогам может на 70 % превышать расход топлива при движении по дорогам об-

щего пользования. Следовательно, поиск путей, направленных на достижение топливной экономичности лесовозными автопоездами и повышение, таким образом, конкурентоспособности лесозаготовительных предприятий, является актуальной задачей, что подтверждается результатами многих исследований зарубежных авторов, область научных интересов которых направлена на повышение эффективности лесовозного автомобильного транспорта, функционирующего в различных изменяющихся природно-климатических условиях [1].

Анализ результатов исследований научных работ зарубежных авторов позволил выявить перечень существенных факторов, от которых во многом зависит эффективность процесса вывозки лесоматериалов лесовозными автопоездами. К этим факторам относят: оптимальное соотношение самозагружающихся лесовозных автомобилей и прицепных звеньев [2-5]; синхронность процессов погрузки, разгрузки и вывозки лесоматериалов; равномерность распределения массы лесоматериалов по осям лесовозных автопоездов, полнота их загрузки [6-8]; изменение влажности и весовых характеристик различных пород лесоматериалов при их вывозке в разные сезоны года, характеризующиеся увеличением количества осадков и налипа-

нием снега; грузоподъемность, маневренность и устойчивость автопоездов [9-11]; протяженность, обустроенность и техническое состояние лесовозных дорог, величина продольного уклона дороги; погодные условия, доступность заезда к месту погрузки и разгрузки лесоматериалов; оптимальный выбор технологий и маршрутов вывозки лесоматериалов [12-14]; затрачиваемые эксплуатационные расходы на техническое обслуживание и ремонт лесовозных автопоездов, запасные части для них, а также на топливо; квалификация водителей, использование для управления автопарком лесовозных автопоездов систем глобального позиционирования [15-16].

Перспективной областью научных исследований в настоящее время является разработка и практическое использование в транспортных средствах рекуперативных механизмов и устройств, позволяющих преобразовывать, накапливать и полезно использовать различные виды энергии. Кроме этого, использование рекуперативных и демпферных механизмов позволяет заметно снизить динамические нагрузки на узлы и детали, как тягача, так и прицепа, и тем самым повысить их надежность. Результаты исследований, проведенных ранее авторами, позволили разработать перспективную конструкцию тягово-сцепного устройства для лесовозного автомобиля с прицепом [20]. Такая конструкция позволяет преобразовывать и полезно использовать кинетическую энергию массы прицепа с лесоматериалами, которая возникает в процессе движения автопоезда по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам в неустановившихся и переходных режимах движения. Накопленная в пневмогидравлическом аккумуляторе энергия рабочей жидкости используется для осуществления погрузочно-разгрузочных работ гидравлическим манипулятором (рис. 1).

Цель работы достигается путем решения двух взаимосвязанных задач. Первая задача заключается в разработке математической модели функционирования пневмогидравлического сцепного устройства, при движении загруженного лесоматериалами лесовозного автомобиля с прицепом по лесовозной дороге. Вторая задача заключается в оптимизации конструктивных параметров пневмогидравлического сцепного устройства лесовозного

автомобиля с прицепом с помощью разработанной компьютерной программы

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Объект исследования является процесс вывозки лесоматериалов лесовозным автомобилем с прицепом, оснащенный пневмогидравлическим сцепным устройством.

В качестве предмета исследования рассматриваются закономерности изменения показателей эффективности работы пневмогидравлического сцепного устройства от высоты неровностей опорной поверхности дороги и конструктивных параметров гидроцилиндра сцепного устройства.

Дизайн эксперимента или сбор данных

Для предварительного исследования работоспособности и эффективности предложенного пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами использовали математическое и компьютерное моделирование. Модель пневмогидравлического сцепного устройства должна позволить: оценить возможность рекуперации энергии рабочей жидкости, а также демпфирующие свойства тягово-сцепного устройства; определить показатели плавности хода автопоезда в различных дорожных условиях; определить оптимальные конструктивные параметры пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами; убедиться, что в широких диапазонах условий движения предлагаемое сцепное устройство остается работоспособным и достаточно эффективным [17-20].

Разработанная модель включает в себя: лесовозный автомобиль и прицеп, как отдельные тела, движущиеся в пространстве; взаимодействие лесовозного автомобиля и прицепа между собой с помощью предложенного пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами; взаимодействие лесовозного автомобиля и прицепа с опорной поверхностью лесовозного дороги через подвеску и колеса; неровную опорную поверхность, характерную для недостаточно обустроенной лесовозной дороги.

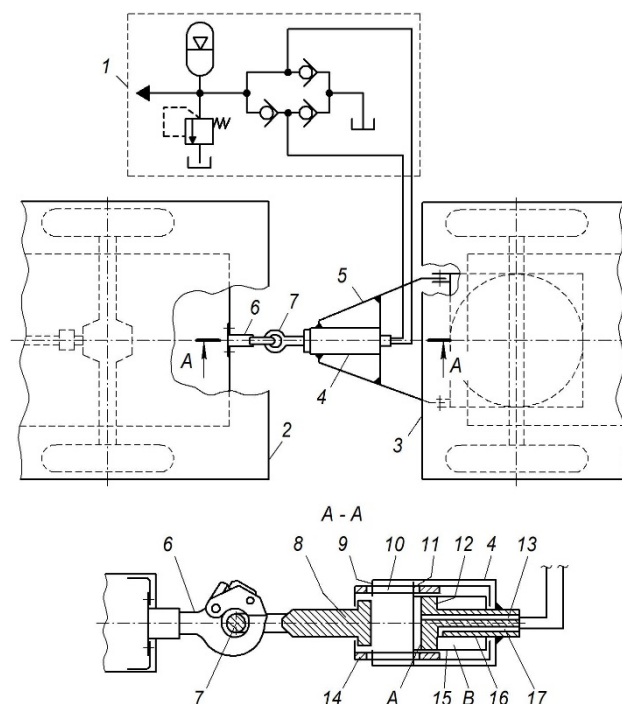


Рисунок 1. Схема пневмогидравлического сцепного устройства с демферным и амортизационным механизмами: *A, B* – поршневая и штоковая полости; *1* – рекуперативный гидропривод; *2* – лесовозный автомобиль; *3* – прицеп; *4* – корпус; *5* – дышло; *6* – крюк; *7* – присоединительная петля; *8* – фланец; *9, 11* – ограничители; *10* – сквозные пазы; *12* – поршень; *13, 17* – каналы; *14* – ограничитель подвижного цилиндра; *15* – гидроцилиндр двухстороннего действия; *16* – шток

Figure 1. Scheme of a pneumohydraulic coupling device with damper and shock-absorbing mechanisms: *A, B* – piston and rod cavities; *1* – recuperative hydraulic drive; *2* – logging vehicle; *3* – trailer; *4* – body; *5* – drawbar; *6* – hook; *7* – connecting loop; *8* – flange; *9, 11* – limiters; *10* – through grooves; *12* – piston; *13, 17* – channels; *14* – movable cylinder limiter; *15* – double-acting hydraulic cylinder; *16* – rod

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Отличительной особенностью данной работы является моделирование четырехосного лесовозного автомобиля и четырехосного прицепа. Для построения модели используются методы классической механики, обладающие высокой физической адекватностью и прогнозируемостью моделируемых объектов. В модели принято допущение, что лесовозный автомобиль и прицеп, за-

груженные лесоматериалами, являются абсолютно твердыми телами. Тела взаимодействуют с неровной опорной поверхностью лесовозной дороги в точках касания передних колес лесовозного автомобиля или сдвоенных колес (задние оси лесовозного автомобиля и все оси прицепа) в предположении об упруго-вязкой силовой зависимости (рис. 2).

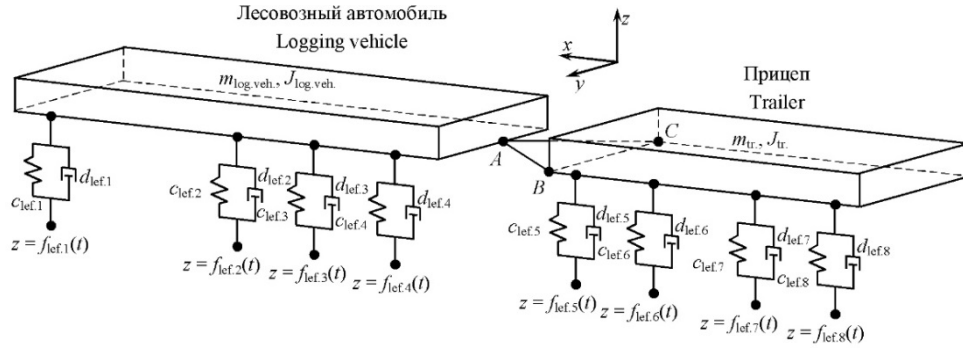


Рисунок 2. Расчетная схема лесовозного автомобиля с прицепом, используемая для создания динамической модели
 Figure 2. Calculation scheme of a logging vehicle with a trailer used to create a dynamic model
 Источник: собственная схема авторов
 Source: authors' ownschema

Поэтому для четырехосного лесовозного автомобиля и четырехосного прицепа рассматриваются по восемь точек касания с опорной поверхностью лесовозной дороги. Между собой лесовозный автомобиль и прицеп взаимодействуют посредством пневмогидравлического сцепного устройства *ABC*, которое предлагается оснастить демпферным и рекуперативным механизмами.

В математической модели задаются отдельно массы корпусов лесовозного автомобиля и прицепа $m_{log.veh.}$ и $m_{tr.}$. Моменты инерции тягача и прицепа $J_{tr.}$ и $J_{log.veh.}$ изменяются в зависимости от мгновенной оси вращения тела и их необходимо регулярно пере-

считывать в процессе моделирования. Основными переменными для составления уравнений динамики являются координаты положения в пространстве центров тяжести тягача ($x_{log.veh.}$, $y_{log.veh.}$, $z_{log.veh.}$) и прицепа ($x_{tr.}$, $y_{tr.}$, $z_{tr.}$), и их углы ориентации ($\varphi_{xlog.veh.}$, $\varphi_{ylog.veh.}$, $\varphi_{zlog.veh.}$), ($\varphi_{xtr.}$, $\varphi_{ytr.}$, $\varphi_{ztr.}$).

Для составления базовой системы уравнений, описывающей движение лесовозного автомобиля и прицепа используется второй закон Ньютона для поступательного движения и основное уравнение динамики вращательного движения. Системы уравнений составлены отдельно для лесовозного автомобиля и прицепа:

$$\left\{ \begin{aligned} m_{log.veh.} \frac{d^2 x_{log.veh.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^4 (F_{lef.i}^x + F_{rig.i}^x) + F_A^x; \\ m_{log.veh.} \frac{d^2 y_{log.veh.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^4 (F_{lef.i}^y + F_{rig.i}^y) + F_A^y; \\ m_{log.veh.} \frac{d^2 z_{log.veh.}}{dt^2} &= -m_{log.veh.} \cdot g + \sum_{i=1}^4 (F_{lef.i}^z + F_{rig.i}^z) + F_A^z; \\ J_{log.veh.x} \frac{d^2 \varphi_{xlog.veh.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^4 (M^x(F_{lef.i}) + M^x(F_{rig.i})) + M^x(F_A); \\ J_{log.veh.y} \frac{d^2 \varphi_{ylog.veh.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^4 (M^y(F_{lef.i}) + M^y(F_{rig.i})) + M^y(F_A); \\ J_{log.veh.z} \frac{d^2 \varphi_{zlog.veh.}}{dt^2} &= \sum_{i=1}^4 (M^z(F_{lef.i}) + M^z(F_{rig.i})) + M^z(F_A); \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} m_{tr.} \frac{d^2 x_{tr.}}{dt^2} &= \sum_{i=5}^8 (F_{lef,i}^x + F_{rig,i}^x) + F_B^x + F_C^x; \\ m_{tr.} \frac{d^2 y_{tr.}}{dt^2} &= \sum_{i=5}^8 (F_{lef,i}^y + F_{rig,i}^y) + F_B^y + F_C^y; \\ m_{tr.} \frac{d^2 z_{tr.}}{dt^2} &= -m_{tr.} \cdot g + \sum_{i=5}^8 (F_{lef,i}^z + F_{rig,i}^z) + F_B^z + F_C^z; \\ J_{tr.x} \frac{d^2 \varphi_{xtr.}}{dt^2} &= \sum_{i=5}^8 (M^x(F_{lef,i}) + M^x(F_{rig,i})) + M^x(F_B) + M^x(F_C); \\ J_{tr.y} \frac{d^2 \varphi_{ytr.}}{dt^2} &= \sum_{i=5}^8 (M^y(F_{lef,i}) + M^y(F_{rig,i})) + M^y(F_B) + M^y(F_C); \\ J_{tr.z} \frac{d^2 \varphi_{ztr.}}{dt^2} &= \sum_{i=5}^8 (M^z(F_{lef,i}) + M^z(F_{rig,i})) + M^z(F_B) + M^z(F_C); \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где $F_{lef,i}$, $F_{rig,i}$ – силы, воспринимаемые колесами i -й оси лесовозного автомобиля с прицепом через их подвесу; t – время; F_A^x , F_A^y , F_A^z и F_{Bx} , F_{By} , F_{Bz} , F_{Cx} , F_{Cy} , F_{Cz} – составляющие сил, действующие от рекуперативного пневмогидравлического сцепного устройства на лесовозный автомобиль и прицеп; M^i – моменты соответствующих сил относительно оси i .

В первом приближении взаимодействие модельных лесовозного автомобиля и прицепа с моделируемой опорной поверхностью дороги принимается упруго-вязким:

$$F_i^z = c_i (z_{sur,i}(x_i, y_i) + R_{wh.} - z_{wh,i}) - d_i \left(\frac{\partial z_{sur,i}(x_i, y_i)}{\partial t} - \frac{\partial z_{wh,i}}{\partial t} \right), \quad (3)$$

где i – порядковый номер колеса лесовозного автомобиля или прицепа; $z_{sur,i}(x, y)$ – вертикальная координата опорной поверхности лесовозной дороги; $R_{wh.}$ – радиус колес прицепа и лесовозного автомобиля; $z_{wh,i}$ – вертикальная координата точки установки колеса на корпусе лесовозного автомобиля или прицепа; d_i , c_i – коэффициенты демпфирования и жесткости, характеризующие упруго-вязкое взаимодействие.

Для колес лесовозного автопоезда в математической модели кроме вертикальной составляющей, учитываются также и горизонтальные составляющие (поперечная и продольная) сил взаимодействия с опорной поверхностью лесовозной дороги.

Из-за разрывного характера функций связи тел в сцепном устройстве и сложных функций рельефа опорной поверхности лесовозной дороги базовая система уравнений, описывающая движе-

ние лесовозного автопоезда не имеет точного аналитического решения. Поэтому в данной работе базовая система дифференциальных уравнений решается численным методом Рунге-Кутты второго порядка. Используя данный метод, значения переменных x и скорости v_x определяются в соответствии со следующей зависимостью:

$$\left\{ \begin{aligned} x_{\tau+1} &= x_{\tau} + v_{x\tau} \cdot \Delta t + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \\ v_{x\tau+1} &= v_{x\tau} + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \Delta t, \end{aligned} \right. \quad (4)$$

где $v_{x\tau}$ и $v_{x\tau+1}$ – значения скоростей движения моделируемого лесовозного автомобиля; x_{τ} и $x_{\tau+1}$ – координаты движения моделируемого лесовозного автомобиля массой m вдоль декартового направления на различных шагах интегрирования по времени.

В результате циклического расчета заполняются таблицы текущих координат и угловых координат тел лесовозного автопоезда. Данные таблично заданные функции позволяют после окончания расчетов определить показатели эффективности предлагаемого пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами.

Для представления неровной опорной поверхности лесовозной дороги в математической модели используется метод комбинации неровностей (выступов) гауссовой формы.

Параметры гауссовых пиков – положение центра, высота, полуширина – выбираются случайным путем с помощью генератора случайных чисел. Перечисленные параметры в математической

модели представляют собой случайные функции с равномерным законом распределения с широкими диапазонами изменения. При представлении опорной поверхности лесовозной дороги необходимо моделировать как малые объекты с протяженностью 0,2 м, так и большие объекты (холмы) с протяженностью порядка 5 м.

Функция $z(x, y)$ рельефа опорной поверхности от координат точки контакта колеса лесовозного автопоезда с поверхностью (x, y) задавалась, как сумма гауссовых функций, учитывающая количество неровностей N_B на лесовозной дороге, положение центра неровности (x_i, y_i) , ее высоты H_i и полуширины σ_i .

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^{N_B} H_i \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (5)$$

Перед началом компьютерного эксперимента помещали заданное количество гауссовых неровностей на контрольный участок лесовозной дороги размерами 500 м на 5 м с помощью генератора случайных чисел. Интервал случайного выбора высоты H_i неровности составлял $[0, 0,1]$, а полуширины $\sigma_i - [0,05, 0,15]$. Статистические характеристики гауссовых неровностей определялись по соответствующим таблицам для лесовозных дорог различной обустроенности.

В математической модели пневмогидравлическое сцепное устройство с рекуперативным и демпферным механизмами представлено эквивалентной схемой с гидроцилиндром двухстороннего действия с упорами поршня в крайних левом и правом положениях. Изменение расстояния между лесовозным автомобилем и прицепом приводит к движению поршня в гидроцилиндре и возникновению соответствующих сил сопротивления изменению расстояния между лесовозным автомобилем и прицепом. Рекуперативный эффект достигается за счет вытеснения рабочей жидкости из полостей A или B гидроцилиндра сцепного устройства в пневмогидравлический аккумулятор для последующего ее использования.

С точки зрения геометрии модели, рекуперативное устройство находится в треугольнике ABC (рис. 2), образованном двумя невесомыми тягами AB и AC .

Сцепное устройство приводится в действие между лесовозным автомобилем и прицепом за счет тяг в упруго-вязком приближении. Изменение длин тяг приводит в модели к движению поршня в гидроцилиндре и соответствующему насосному эффекту. Перед началом движения лесовозного автопоезда или в процессе движения с приблизительно постоянной скоростью поршень расположен в крайнем левом положении. При этом полость B гидравлического цилиндра устройства заполнена рабочей жидкостью. В процессе движения лесовозного автомобиля с прицепом с ускорением происходит перемещение поршня в крайнее правое положение, вытеснение рабочей жидкости из полости B и закачивание рабочей жидкости в полость A . При торможении (замедлении) лесовозного автопоезда происходит вытеснение рабочей жидкости из полости A в пневмогидравлический аккумулятор и заполнение рабочей жидкостью полости B (рис. 1).

Цикл работы пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами многократно повторяется по мере движения лесовозного автопоезда.

Изменение конструкции тягово-сцепного устройства может ухудшить плавность хода лесовозного автопоезда. Изменение демпфирующих свойств тягово-сцепного устройства путем установки рекуперативного гидроцилиндра может повлечь резкие ускорения прицепа относительно лесовозного автомобиля. Для контроля плавности хода использовали такой показатель эффективности, как среднее ускорение прицепа в продольном направлении. Отсчет ведется по отношению к неподвижной системе координат.

Обычно показатели эффективности определенного объекта отражают производительность объекта и качество его работы. В данном случае в качестве показателей эффективности пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами выбраны рекуперлируемая мощность N_{rec} и плавность хода, количественно выражаемая переменной продольным ускорением прицепа $a_{пр}$.

Рекуперлируемая мощность в данный момент времени t рассчитывалась в математической модели по формуле

$$N_{rec.}(t) = d_0 \left(\frac{D_{hyd.cyl.}}{D_{hyd.cyl.0}} \right)^2 \cdot \left[\left(\frac{dL_{AB}(t)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dL_{AC}(t)}{dt} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где d_0 – коэффициент демпфирования; $D_{hyd.cyl.}$ – диаметр гидроцилиндра; L_{AB} и L_{AC} – длины тяг тягово-сцепного устройства.

Значение продольного ускорения прицепа относительно лесовозного автомобиля в базовой системе координат в текущий момент модельного времени рассчитывалось по формуле

$$a_{tr.}(t) = \frac{d^2 x_{tr.}(t)}{dt^2}, \quad (7)$$

где $x_{tr.}$ – координата центра тяжести прицепа.

На основе только мгновенных значений показателей эффективности, из-за их высокого случайного разброса вызванного случайным рельефом опорной поверхности лесовозной дороги, сложно сравнивать различные варианты рекуперативного устройства. Поэтому по функциям $N_{rec.}(t)$ и $a_{tr.}(t)$ определялись усредненные показатели рекуперированной мощности $N_{rec.av.}$ и продольного ускорения прицепа $a_{tr.av.}$:

$$N_{rec.av.} = \frac{1}{t_{ky} - t_{ny}} \int_{t_{ny}}^{t_{ky}} N_{rec.}(t) dt; \quad (8)$$

$$a_{tr.av.} = \frac{1}{t_{ky} - t_{ny}} \int_{t_{ny}}^{t_{ky}} a_{tr.}(t) dt, \quad (9)$$

На основе изложенного выше математического аппарата составлена «Программа для моделирования движения четырехосных лесовозного автомобиля и прицепа с пневмогидравлическим сцепным устройством с рекуперативным и демпферным механизмами» на языке Object Pascal.

Программа предназначена для компьютерного моделирования движения лесовозного автопоезда в составе четырехосного лесовозного автомобиля и четырехосного прицепа по лесовозной дороге.

Программа позволяет:

- проводить компьютерные эксперименты с лесовозным автопоездом при его движении в сложных дорожных условиях, характеризующихся раз-

личным уровнем обустроенности опорной поверхности лесовозной дороги;

- задавать в тексте программы геометрические, кинематические, динамические и конструктивные параметры исследуемого лесовозного автомобиля с прицепом, условия движения, а также параметры неровностей опорной поверхности лесовозной дороги;

- рассчитывать мгновенную и среднюю рекуперированную мощность в пневмогидравлическом сцепном устройстве с рекуперативным и демпферным механизмами, а также плавность хода прицепа;

- выводить на экран схематичное изображение лесовозного автопоезда (проекцию XZ), пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами, числовые значения и графики зависимости от времени показателей эффективности (рис. 3).

В процессе дальнейшего теоретического исследования определим влияние четырех параметров модели на показатели эффективности пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами. Схематично зависимость входных и выходных характеристик математической модели приведена на рис. 4.

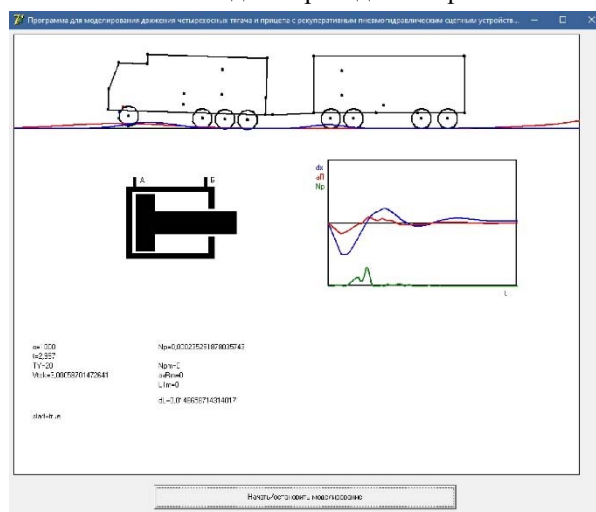


Рисунок 3. Интерфейсная форма вывода результатов компьютерного эксперимента

Figure 3. Interface form for displaying the results of a computer experiment

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme



Рисунок 4. Входные и выходные переменные математической модели

Figure 4. Input and output variables of the mathematical model

Источник: собственная схема авторов

Source: authors' own scheme

Входные переменные образуют две группы. К первой группе относятся геометрические параметры гидроцилиндра рекуперативного устройства: $D_{hydr.cyl.}$ – внутренний диаметр рекуперативного гидроцилиндра; $L_{hydr.cyl.}$ – максимальное перемещение поршня (ход) в рекуперативном гидроцилиндре. Ко второй группе: v – продольная скорость движения лесовозного автомобиля с прицепом; $h_{av.}$ – среднее значение высоты неровностей опорной поверхности. Выходными переменными математической модели являются: $N_{rec.av.}$ – средняя рекуперированная мощность; $a_{tr.av.}$ – среднее продольное ускорение прицепа относительно лесовозного автомобиля.

Результаты и обсуждения

Одной из задач дальнейшего теоретического исследования является оптимизация параметров пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами $D_{hydr.cyl.}$, $L_{hydr.cyl.}$. Также важной задачей теоретического исследования является оценка влияния условий движения лесовозного автопоезда (скорости движения v и средней высоты неровностей $h_{av.}$ лесовозной дороги) на работоспособность и эффективность разработанного пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами. Первичная проверка модели проведена для наиболее типичного набора

входных параметров. В ходе первичной проверки оценивали работоспособность нового пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами.

На начальном этапе проведения компьютерных экспериментов выполнялась подготовка функций $z(x)$ высоты опорной поверхности: как для колес левого, так и правого борта лесовозного автопоезда. В нулевой момент времени компьютерного эксперимента модельные лесовозный автомобиль и прицеп помещались на высоте 1 м над опорной поверхностью лесовозной дороги. За первые 3 ... 4 секунды модельного времени лесовозный автопоезд опускается на опорную поверхность, совершает колебания во всех декартовых и угловых направлениях и практически приходят в состояние динамического равновесия.

Скорость v_x движения лесовозного автомобиля выдерживалась неизменной и составляла 30 км/ч. Скорость прицепа в модели не задавалась искусственно, а определялась путем решения дифференциальных уравнений движения. Такой подход позволил рассчитывать ускорение прицепа и оценивать плавность его хода.

Полученный в процессе компьютерного эксперимента график зависимости мгновенной рекуперированной мощности от времени отражает многократные циклические срабатывания пневмо-

гидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами (рис. 5, а).

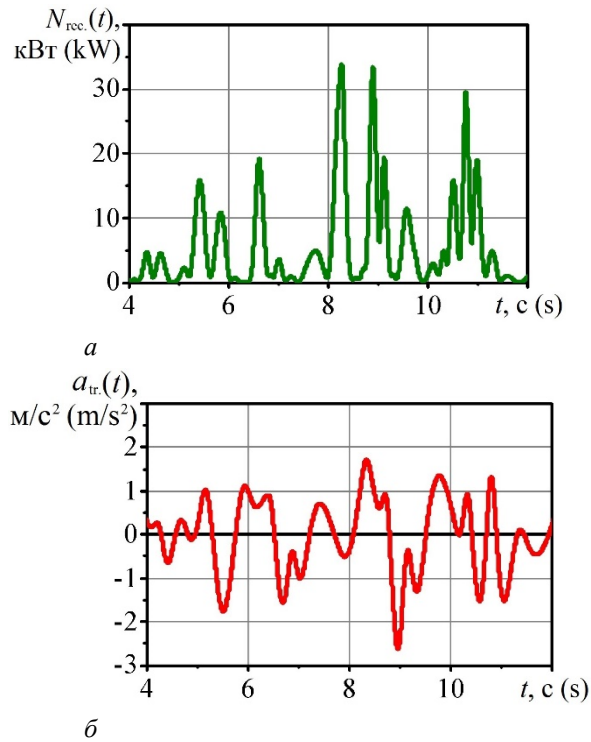


Рисунок 5. Зависимости изменения с течением времени t значений рекуперированной мощности N_{rec} . (а) и продольного ускорения прицепа a_{tr} . (б) относительно лесовозного автомобиля

Figure 5. Dependences of change over time t of the values of the recuperated power N_{rec} . (а) and longitudinal acceleration of the trailer a_{tr} . (б) in relation to a logging vehicle

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Локальные максимумы функции $N_{rec}(t)$ могут достигать 11 ... 34 кВт. Однако усредненная по времени рекуперированная мощность составила около 7 кВт. Ускорение прицепа a_{tr} в направлении оси OX (рис. 5, б) количественно характеризует плавность хода, под которой понимается уровень равномерности движения прицепа. Амплитуда колебаний ускорения прицепа составляют 0,9 ... 2,6 m/s^2 . Однако усредненное по времени продольное ускорение составляет значительно меньшую величину 0,83 m/s^2 .

Таким образом, первичная проверка модели показала, что пневмогидравлическое сцепное устройство с рекуперативным и демпферным ме-

ханизмами позволяет при движении автопоезда в заданных дорожных условиях со скоростью 30 км/ч рекуперировать в среднем около 7,0 кВт мощности, при среднем продольном ускорении прицепа, равное примерно 0,83 m/s^2 .

Определение оптимальной комбинации конструктивных параметров пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами представляет собой задачу многофакторной оптимизации. В данной работе задача оптимизации упрощена до двух факторной: необходимо найти оптимальную комбинацию геометрических параметров рекуперативного устройства – диаметра гидроцилиндра $D_{hydr.cyl.}$ и хода поршня $L_{hydr.cyl.}$, при которых будет максимальной величина рекуперированной мощности $N_{rec.av.}$ и минимальное среднее ускорение прицепа $a_{tr.av.}$ относительно лесовозного автомобиля:

$$\begin{cases} N_{rec.av.}(D_{hydr.cyl.}, L_{hydr.cyl.}) \rightarrow \max; \\ a_{tr.av.}(D_{hydr.cyl.}, L_{hydr.cyl.}) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (10)$$

Для решения задачи оптимизации провели серию из девяти компьютерных экспериментов, в ходе которых изменяли $D_{hydr.cyl.}$ на уровнях 80, 100, 120 мм, и $L_{hydr.cyl.}$ на уровнях 60, 80, 100 мм. Полученные в результате компьютерных экспериментов показатели эффективности представлены в табл. 1.

На основе приведенного набора данных получены полиномиальные формулы путем аппроксимации методом наименьших квадратов в программе MathCAD 14:

$$\begin{aligned} N_{rec.av.}(D_{hydr.cyl.}, L_{hydr.cyl.}) = & -5,542 \cdot 10^{-4} D_{hydr.cyl.}^2 - \\ & - 8,792 \cdot 10^{-4} L_{hydr.cyl.}^2 - 3,125 \cdot 10^{-4} D_{hydr.cyl.} \cdot L_{hydr.cyl.} + \\ & + 0,11 D_{hydr.cyl.} + 0,229 L_{hydr.cyl.} - 10,9; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} a_{tr.av.}(D_{hydr.cyl.}, L_{hydr.cyl.}) = & - 4,97 \cdot 10^{-5} L_{hydr.cyl.}^2 - \\ & - 2,487 \cdot 10^{-5} D_{hydr.cyl.} \cdot L_{hydr.cyl.} + 9,98 \cdot 10^{-3} D_{hydr.cyl.} + \\ & + 5,02 \cdot 10^{-3} L_{hydr.cyl.} - 0,051, \end{aligned} \quad (12)$$

где $N_{rec.av.}$ – рекуперированная мощность, создаваемая сцепным устройством, кВт; $a_{tr.av.}$ – продольно ускорение прицепа относительно лесовозного автомобиля, m/s^2 ; $D_{hydr.cyl.}$ – диаметр гидроцилиндра, мм; $L_{hydr.cyl.}$ – ход поршня, мм.

Результаты компьютерных экспериментов, с целью оценки влияния параметров рекуперированного и демпфирующего механизмов на их эффективность

Table 1

The results of computer experiments in order to assess the influence of the parameters of the recuperated and damping mechanisms on their effectiveness

Номер компьютерного эксперимента Computer experiment number	Исследуемые параметры Researched parameters			
	$D_{hydr.cyl.}$ мм (mm)	$L_{hydr.cyl.}$ мм (mm)	$N_{rec.av.}$ кВт (kW)	$a_{tr.av.}$ м/с ² (m/s ²)
1	80	60	4,83	0,75
2	80	80	6,87	0,67
3	80	100	8,20	0,55
4	100	60	4,91	0,92
5	100	80	7,02	0,83
6	100	100	8,45	0,70
7	120	60	4,73	1,09
8	120	80	6,75	0,99
9	120	100	8,05	0,85

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Вышеприведенные зависимости позволяют осуществить быструю оценку исследуемых показателей эффективности работы сцепного устройства лесовозного автопоезда. Для визуального анализа полученные функции построены в виде трехмерных графиков (рис. 6) и картограмм оптимизации (рис. 7). Графики позволяют в наглядной форме осуществить оценку исследуемых показателей эффективности предлагаемого сцепного устройства при изменении диаметра гидроцилиндра $D_{hydr.cyl.}$ и хода поршня $L_{hydr.cyl.}$

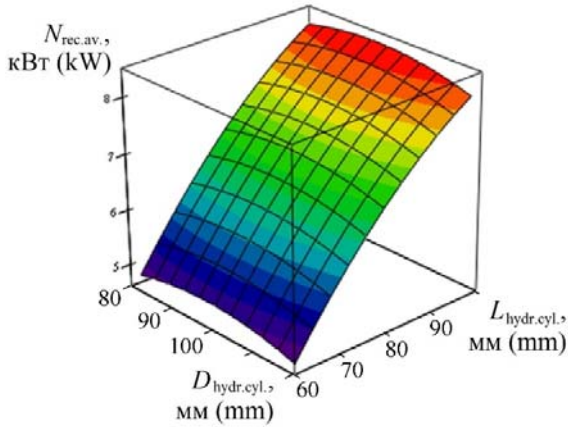
Картограммы оптимизации (рис. 7) являются изображением «вида сверху» трехмерных графиков, поверхность которых представляется линиями уровня. Пример использования картограммы оптимизации конструктивных параметров пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами приведен на рисунке 7, а. В случае если диаметр гидроцилиндра составляет 90 мм (точка А) и ход поршня составляет 80 мм (точка В), то рекуперированная мощность составляет около 7 кВт. Затемненные области, приведенные на картограммах,

характеризуют наиболее благоприятные значения исследуемых показателей эффективности.

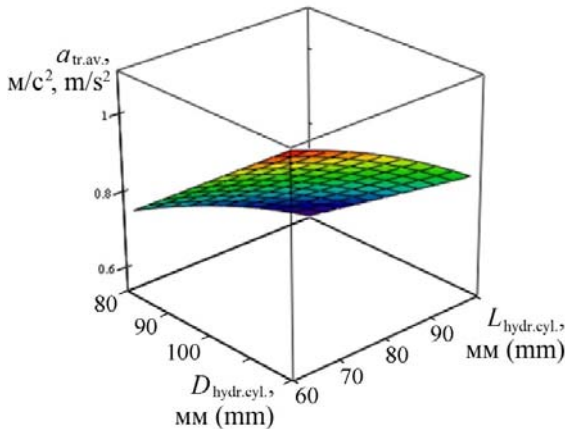
Пороговыми уровнями в процессе разделения на благоприятную и неблагоприятную области выбраны 7 кВт (рис. 10, а) и 0,8 м/с² (рис. 7, б). При этом учитывалось, что характерной особенностью наиболее благоприятной области должно являться занимаемая ею протяженная доля факторного пространства. Эта благоприятная область должна включать в себя максимальные и минимальные значения критериев, а ее граница должна быть привязана к линии уровня. Место пересечения благоприятных областей (рис. 7, в) изображает общую оптимальную область, которая одновременно включает в себя максимальную рекуперированную мощность и минимальное ускорение прицепа.

По расположению оптимальной области на картограмме можно заключить, что значение оптимального диаметра рекуперативного гидроцилиндра сцепного устройства составляет 80 ... 100 мм, оптимальный ход поршня 83 ... 100 мм. При этом средняя мощность, рекуперированная сцепным устройством, составит не менее 7 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа составит не более 0,8 м/с². Кроме этого, существенное

влияние на показатели эффективности предлагаемого сцепного устройства также оказывает высота неровностей h_{sur} , имеющихся на опорной поверхности лесовозной дороги. С целью определения зависимостей влияния высоты неровностей опорной поверхности на исследуемые показатели эффективности проведена серия компьютерных экспериментов, в ходе которых значение высоты неровностей h_{sur} изменяли в диапазоне от 0,1 до 0,5 м с шагом 0,1 м.



a

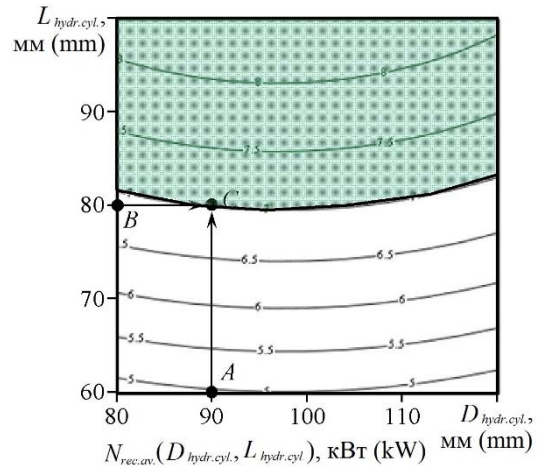


б

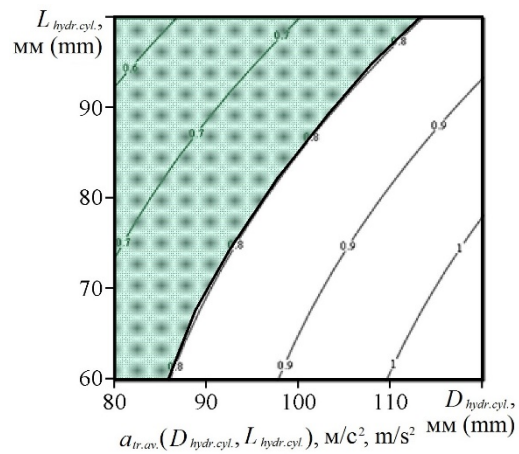
Рисунок 6. Графики влияния диаметра $D_{hydr.cyl.}$ гидроцилиндра и хода поршня $L_{hydr.cyl.}$ на изменение значений рекуперированной мощности $N_{rec.av.}$ (a) и ускорений прицепа $a_{tr.av.}$ (б) относительно лесовозного автомобиля

Figure 6. Graphs of the influence of the diameter $D_{hydr.cyl.}$ hydraulic cylinder and piston stroke $L_{hydr.cyl.}$ to change the values of the recuperated power $N_{rec.av.}$ (a) and trailer accelerations $a_{tr.av.}$ (b) in relation to the logging vehicle

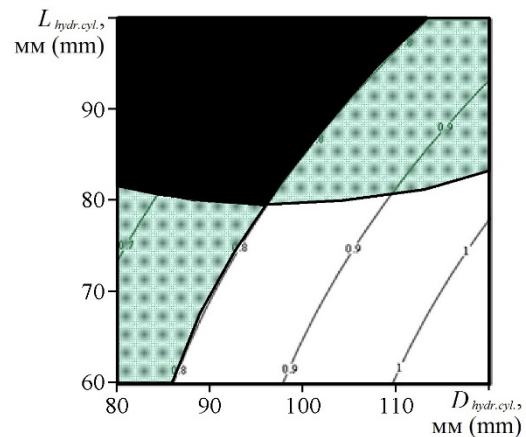
Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations



a



б



в

Рисунок 7. Картограммы оптимизации конструктивных параметров пневмогидравлического сцепного устройства

Figure 7. Optimization cartograms design parameters of the pneumohydraulic coupling device

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Анализ данных

На рис. 8 помимо точек, полученных в результате компьютерного эксперимента, приведены зеленые сплошные кривые, представляющие собой результат аппроксимации методом наименьших квадратов полиномом второго порядка, красные штриховые линии – границы доверительного интервала (confidenceband) со статистической достоверностью 0,95, пунктирные синие линии – границы интервала прогнозирования (predictionband) со статистической надежностью 0,95.

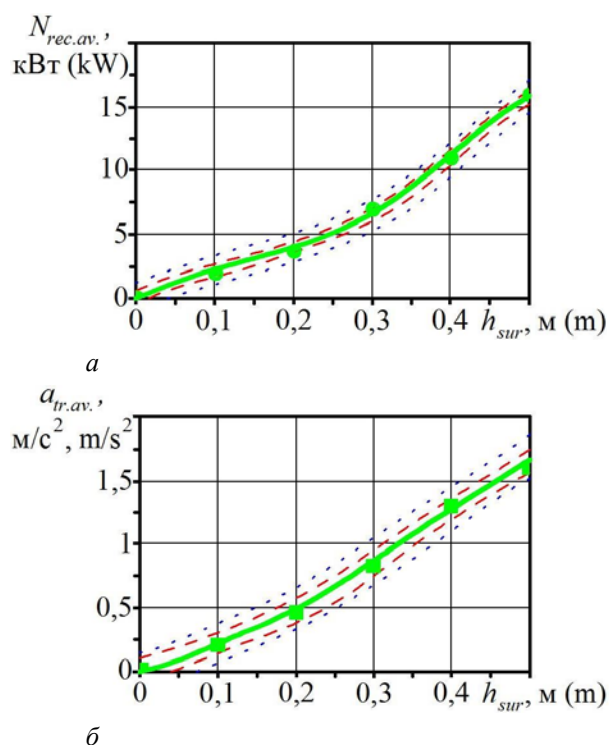


Рисунок 8. Зависимости изменения значений recuperated power и продольного ускорения при увеличении высоты неровностей h_{sur} опорной поверхности лесовозной дороги

Figure 8. Dependences of the change in the values of the recuperated power and the longitudinal acceleration with an increase in the height of the irregularities h_{sur} supporting surface of the logging road

Источник: собственные вычисления авторов
Source: authors' own calculations

Обнаружено, что увеличение средней высоты неровностей h_{sur} опорной поверхности лесовозной дороги приводит к увеличению средней

рекуперированной мощности $N_{rec.av.}$ практически по квадратичному закону (рис. 8, а). Увеличение среднего продольного ускорения $a_{tr.av.}$ происходит так же, по практически квадратичному закону, однако до высоты неровностей h_{sur} опорной поверхности лесовозной дороги, равной 0,4 м, после этого темп роста продольного ускорения $a_{tr.av.}$ замедляется (рис. 8, б).

Таким образом, разработанное пневмогидравлическое сцепное устройство с рекуперативным и демпферным механизмами остается эффективным в широком диапазоне высот неровностей 0,1 ... 0,5 м, обеспечивая рекуперированную мощность 2,2 ... 16,1 кВт при приемлемых значениях ускорения прицепа соответственно 0,22 ... 1,58 м/с².

Выводы

Анализ работ зарубежных ученых позволил выявить основные факторы, от которых зависит эффективность вывозки лесоматериалов лесовозными автомобилями с прицепами. С целью повышения эффективности процесса вывозки лесоматериалов, авторами была предложена перспективная конструкция сцепного устройства, позволяющая преобразовывать и полезно использовать кинетическую энергию массы прицепа с лесоматериалами, которая возникает в процессе движения автопоезда по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам в неустановившихся и переходных режимах движения. Накопленная в пневмогидравлическом аккумуляторе энергия рабочей жидкости используется для осуществления погрузочно-разгрузочных работ гидравлическим манипулятором.

Разработаны математическая модель и компьютерная программа движения лесовозного автопоезда в изменяющихся дорожных условиях. Компьютерное моделирование позволило осуществить предварительную оценку работоспособности предлагаемого пневмогидравлического сцепного устройства с рекуперативным и демпферным механизмами за счет выявления и анализа зависимостей, характеризующих изменение исследуемых показателей эффективности от условий движения автопоезда и конструктивных параметров устройства.

Установлено, что сцепное устройство с рекуперативным и демпферным механизмами при движении четырехосных лесовозного автомобиля и при-

цепы в сложных дорожных условиях со скоростью 30 км/ч дает возможность рекуперировать до 7 кВт, при этом, значение продольного ускорения прицепного звена относительно лесовозного автомобиля не превышает 0,83 м/с².

Оптимальный рабочий диаметр рекуперативного гидроцилиндра составляет 80 ... 100 мм, оптимальный ход поршня 83 ... 100 мм. При этом средняя мощность, рекуперированная устройством, составит не менее 7,0 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа составит не более 0,8 м/с². Разработанная система рекуперации остается эффективной в широком диапазоне высот неровностей

0,2 ... 0,4 м, обеспечивая рекуперированную мощность 2,3 ... 19,7 кВт соответственно при приемлемом значении среднего продольного ускорения 0,3 ... 2,2 м/с.

Разработанное пневмогидравлическое сцепное устройство с рекуперативным и демпферным механизмами остается эффективным в широком диапазоне высот неровностей 0,1 ... 0,5 м, обеспечивая рекуперированную мощность 2,2 ... 16,1 кВт при незначительных значениях ускорения прицепа относительно лесовозного автомобиля – 0,22 ... 1,58 м/с².

Список литературы

1. Никонов, В. О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта : монография / В. О. Никонов ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛУ». – Воронеж, 2021. – 203 с. – *Библиогр.* : с. 181-202 (196 назв.). Режим доступа : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45694525>
2. Akay A. E. Determination of the Safest Route for Logging Trucks Based on Road Types and Conditions / A. E. Akay // *Environ. Sci. Proc.* 2021 3 5. *Библиогр.* : p. 6 (12 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/IECF2020-08068>
3. Akay A. E. Evaluating the Effects of Improving Forest Road Standards on Economic Value of Forest Products / A. E. Akay, H. Serin, J. Sessions, E. Bilici, M. Pak // *Croat. J. For. Eng.* 42 (2021) 2 pp. 245-258. – *Библиогр.* : pp. 257-258 (20 titles). – DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2021.851>
4. Allman M. Operational Parameters of Logging Trucks Working in Mountainous Terrains of the western Carpathians / M. Allman, Z. Dudakova, M. Jankovsky, J. Merganic // *Forests.* 2021, 12, 718 – 13 p. – *Библиогр.* : pp. 12-13 (27 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f12060718>
5. Alrejilal A. Impact of crosswinds and truck weight on rollover propensity when negotiating combined curves / A. Alrejilal, K. Ksaibati // *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2022. *Библиогр.* : pp. 16-17 (52 titles). – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.01.001>
6. Anttila P. The effect of winter weather on timber truck tare weights / P. Anttila, T. Nummelin, K. Väätäinen, J. Laitila // *Silva Fennica*, 2020, vol. 54 no. 4 article id 10385. 16 p. – *Библиогр.* : pp. 14-16. (24 titles). – DOI: <http://doi.org/10.14214/sf.10385>
7. Brown M. W. Evaluation of the Impact of Timber Truck Configuration and Tare Weight On Payload Efficiency : An Australian Case Study / M. W. Brown // *Forests* 2021, 12, 855. – 11 p. – *Библиогр.* : pp. 11 (24 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f12070855>
8. Chevalier P. Cost Analysis of Weyerhaeuser is Pembina Timberlands Log Haul / P. Chevalier // *Faculty of natural resources management Lakehead University*, April 6, 2018. – 54 p. – *Библиогр.* : pp. 31-32 (23 titles).
9. J. L. Conrad I. V. Costs and Challenges of Log Truck Transportation in Georgia, USA / J. L. Conrad I. V. // *Forests* 2018, 9, 650 – 14 p. – *Библиогр.* : pp. 12-14 (31 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f9100650>
10. Kogler C. Simulating Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain / C. Kogler, A. Stenitzer, P. Rauch // *Forests* 2020, 11, 1245 15 p. – *Библиогр.* : pp. 14-15 (27 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f11121245>
11. Kozakiewicz P. Importance of the Moisture Content of Large-Sized Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Round wood in its Road Transport / P. Kozakiewicz, L. Tymendorf, G. Trzcinski // *Forests* 2021, 12, 879 13 p. – *Библиогр.* : pp. 12-13 (36 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f122070879>

12. Moreno G. Stability of Heavy Articulated Vehicles : Effect of Load Distribution / G. Moreno, V. Manenti, G. Guerero, L. Nicolazzi, R. Vieira, D. Martins // *Transportation Research Procedia* 33 (2018) 211-218. *Bibliogr.* : p. 218 (19 titles). – DOI: <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.094>
13. Palander T. Improving Energy Efficiency in a Synchronized Road – Transportation System by Using a TFMC (Transportation Fleet – Management Control) in Finland / T. Palander, K. Karha // *Energies* 2019, 12, 670. – 15 p. – *Bibliogr.* : pp. 14-15 (57 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/en12040670>
14. Pandur Z. Energy Efficiency of Timber Transport by Trucks on Milly and Mountainous Forest Roads / Z. Pandur, H. Neveceral, M. Susnjar, M. Bacic, K. Lepoglavec // *Forestist* 2021. – *Bibliogr.* : pp. 9-10 (31 titles). – DOI: <http://doi.org/10.5152/forestist.2021.21012>
15. Trzcinski G. Total Weight and Axle Loads of Truck Units in the Transport of Timber Depending on the Timber Cargo / G. Trzcinski, T. Moskalik, R. Wojtan // *Forests* 2018 9 164 12 p. – *Bibliogr.* : pp. 10-12 (40 titles). – DOI: <http://doi.org/10.3390/f9040164>
16. Vaatainen K. Roundwood and Biomass Logistics in Finland and Sweden / K. Vaatainen, P. Anttila, L. Elisson, J. Routa // *Croat. J. For. Eng.* 42 (2021) 1 pp. 39-61. – *Bibliogr.* : pp. 54-61 (190 titles). – DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfc.2021.803>
17. Посметьев, В. И. Компьютерное моделирование рекуперативного тягово-цепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // *Лесной журнал*. 2019, № 4. – С. 108-123. – *Библиогр.* : с. 120-123 (20 назв.). – DOI: <http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.108>
18. Никонов, В. О. Рекуперация гидравлической энергии в тягово-цепном устройстве лесовозного автомобиля с прицепом / В. О. Никонов, В. И. Посметьев, К. А. Яковлев // *Лесотехнический журнал*. – 2018. – № 4. – С. 230-239. – *Библиогр.* : с. 238-239 (10 назв.). – DOI: http://doi.org/10.12737/article_5c1a323b1d0433.96668845
19. Посметьев, В. И. Имитационная модель оценки эффективности лесовозного автопоезда, оснащенного рекуперативным пневмогидравлическим тягово-цепным устройством / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев, И. В. Сизьмин // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – Т. 10. – № 4 (40). – С. 181-196. – *Библиогр.* : с. 193-196 (20 назв.). – DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/15>
20. Посметьев, В. И. Повышение эффективности лесовозного автопоезда путем использования рекуперативного пневмогидравлического сцепного устройства / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, И. В. Сизьмин // *Воронежский научно-технический вестник*. – 2021. – Т. 4, № 4 (38). – С. 70-85. – *Библиогр.* : с. 81-85 (28 назв.). – DOI: <http://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-70-85>

References

1. Nikonov V. O. *Sovremennoe sostoyanie, problemi i puti povsheniya effektivnosti lesovoznogo avtomobilnogo transporta* [Current state, problems and ways to improve the efficiency of timber road transport]. Monography ; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "VGLTU". – Voronezh, 2021. – 203 p. (In Russ.). Available at : <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45694525>
2. Akay A. E. Determination of the Safest Route for Logging Trucks Based on Road Types and Conditions, *Environ. Sci. Proc.* 2021 3 5. DOI: <http://doi.org/10.3390/IECF2020-08068>
3. Akay A. E., Serin H., Sessions J., Bilici E., Pak M. Evaluating the Effects of Improving Forest Road Standards on Economic Value of Forest Products. *Croat. J. For. Eng.* 42 (2021) 2 pp. 245-258. DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2021.851>
4. Allman M., Dudakova Z., Jankovsky M., Merganic J. Operational Parameters of Logging Trucks Working in Mountainous Terrains of the western Carpathians. *Forests* 2021, 12, 718 – 13 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f12060718>
5. Alrejjal A., Ksaibati K. Impact of crosswinds and truck weight on rollover propensity when negotiating combined curves, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijst.2022.01.001>

6. Anttila P., Nummelin T., Väättäin K., Laitila J. The effect of winter weather on timber truck tare weights. *Silva Fennica* vol. 54 no. 4 article id 10385. 16 p. DOI: <http://doi.org/10.14214/sf.10385>
7. Brown M. W. Evaluation of the Impact of Timber Truck Configuration and Tare Weight On Payload Efficiency : An Australian Case Study. *Forests* 2021, 12, 855. – 11 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f12070855>
8. Chevalier P. Cost Analysis of Weyerhaeuser is Pembina Timberlands Log Haul. Faculty of natural resources management Lakehead University, April 6, 2018. – 54 p.
9. J. L. Conrad I. V. Costs and Challenges of Log Truck Transportation in Georgia, USA. *Forests* 2018, 9, 650 – 14 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f9100650>
10. Kogler C., Stenitzer A., Rauch P. Simulating Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain. *Forests* 2020, 11, 1245 15 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f11121245>
11. Kozakiewicz P., Tymendorf L., Trzcinski G. Importance of the Moisture Content of Large-Sized Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Round wood in its Road Transport. *Forests* 2021, 12, 879 13 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f122070879>
12. Moreno G., Manenti V., Guerero G., Nicolazzi L., Vieira R., Martins D. Stability of Heavy Articulated Vehicles : Effect of Load Distribution, *Transportation Research Procedia* 33 (2018) 211-218. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.094>
13. Palander T., Karha K. Improving Energy Efficiency in a Synchronized Road – Transportation System by Using a TFMC (Transportation Fleet – Management Control) in Finland. *Energies* 2019, 12, 670, 15 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/en12040670>
14. Pandur Z., Neveceral H., Susnjar M., Bacic M., Lepoglavec K. Energy Efficiency of Timber Transport by Trucks on Milly and Mountainous Forest Roads. *Forestist* 2021. DOI: <http://doi.org/10.5152/forestist.2021.21012>
15. Trzcinski G., Moskalik T., Wojtan R. Total Weight and Axle Loads of Truck Units in the Transport of Timber Depending on the Timber Cargo. *Forests* 2018 9 164 12 p. DOI: <http://doi.org/10.3390/f9040164>
16. Vaatainen K., Anttila P., Elisson L., Routa J. Roundwood and Biomass Logistics in Finland and. *Croat. j. for. eng.* 42 (2021) 1 pp. 39-61. DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfc.2021.803>
17. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. Computer Simulation of the Recuperative Towing Coupler of a Forest Truck with a Trailer // *Lesnoy Zhurnal* (Russian forestry journal), 2019, № 4. – pp. 108-123. DOI: <http://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.108>
18. Nikonov V. O., Posmetev V. I., Yakovlev K. A. *Rekuperaciya gidravlicheskoj energii v tyagovo_scepnom ustroistve lesovoznogo avtomobilya s pricepom* [Recovery of hydraulic energy in the towing hitch of a timber truck with a trailer]. *Forestry journal*. – 2018. – № 4. – P. 230-239. DOI: http://doi.org/10.12737/article_5c1a323b1d0433.96668845. (In Russ.).
19. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V., Sizmin I. V. *Imitacionnaya model ocenki effektivnosti lesovoznogo avtopoezda, osnaschennogo rekuperativnim pnevmogidravlicheskim tyagovo-scepnim ustroistvom* [Simulation model for evaluating the efficiency of a timber road train equipped with a recuperative pneumohydraulic towing device]. *Forestry journal*. – 2020. – T. 10. – № 4 (40). – S. 181-196. DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/15>. (In Russ.).
20. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Sizmin I. V. *Povishenie effektivnosti lesovoznogo avtopoezda putem ispolzovaniya rekuperativnogo pnevmogidravlicheskogo scepnogo ustroistva* [Increasing the efficiency of a timber road train by using a recuperative pneumohydraulic coupling device]. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. – 2021. – T. 4, № 4 (38). – S. 70-85. DOI: <http://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-70-85>

Сведения об авторах

✉ *Никонов Вадим Олегович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Посметьев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроительных технологий, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

Зеликов Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

Чуйков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, Республика Беларусь, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

Information about the authors

✉ *Nikonov Vadim Olegovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7380-9180>, e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Posmetyev Valerii Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9878-7451>, e-mail: posmetyev@mail.ru.

Zelikov Vladimir Anatolyevich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2317-9413>, e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Posmetyev Viktor Valerevich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6622-5358>, e-mail: victorvpo@mail.ru.

Chuikov Alexey Sergeevich – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Belarussian State Technological University, 13a, Sverdlov str., Minsk, 220006, Belarus, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/12>

УДК 630*307



Оценка видового разнообразия растительности, произрастающей на территориях линейных инфраструктурных объектов Центральной России

Алексей А. Платонов✉, raa7@rambler.ru,  0000-0003-4114-4636

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038, Российская Федерация

При формировании защитных лесных насаждений вдоль линейных инфраструктурных объектов возникает проблема последующего самопроизвольного размножения деревьев и кустарников, захламляющих территории вышеуказанных объектов и создающих угрозу безопасности их функционирования. Работы по очистке территорий объектов инфраструктуры от нежелательной древесно-кустарниковой растительности нередко организуются без достаточно чёткого представления о характеристиках подлежащей удалению упомянутой растительности, что негативным образом отражается на качестве выполнения указанных работ. Целью исследования является определение видового состава нежелательных растительных сообществ, формирующихся на территориях линейных инфраструктурных объектов, для повышения эффективности их удаления и составления рекомендаций по надлежащему содержанию указанных территорий. Выявлено, что большинство видов нежелательной растительности, произрастающей на территориях линейных инфраструктурных объектов Центральной части России, относятся к Magnoliophyta (цветковые, около 97 %) и к Pinophyta (голосеменные, около 3 %). Около 54 % охранных зон линий электропередачи и полос отвода автомобильных дорог, а также около 33 % полос отвода железных дорог Центральной части России обладают схожим видовым составом нежелательной растительности, однако максимальная схожесть не обеспечивается расположением участков инфраструктурных объектов в непосредственной близости друг относительно друга. Для охранных зон линий электропередачи возможно определение видового состава произрастающей нежелательной растительности на одном из таких участков с последующим распространением результатов исследования на другой близлежащий участок. Для полос отвода железных дорог подобное распространение результатов исследования нецелесообразно. Фактически на каждом из участков полос отвода автомобильных и железных дорог, а также трасс линий электропередачи Центральной России произрастают такие виды нежелательной растительности, как клён ясенелистный (*Acer negundo* L., с долей участия в исследуемых растительных сообществах от 6,3 % до 98,1 %) и вяз гладкий (*Ulmus laevis* Pall, с долей участия от 1,1 % до 41,1 %). Среди наиболее ожидаемых к произрастанию на указанных территориях видов нежелательной древесно-кустарниковой растительности около 36 % склонны к своему возобновлению пневым порослью, около 42 % – корневыми отпрысками, около 22 % – иными способами. Для повышения эффективности удаления нежелательной растительности в целях надлежащего содержания территорий инфраструктурных объектов рекомендовано применять способы и методы, предусматривающие либо механическое удаление указанной растительности вместе с корнями (например, её вырывание), либо комбинированное на неё воздействие: удаление надземных частей растительности осенью с обязательной последующей весенней обработкой гербицидами появившейся молодой пневой поросли и корневых отпрысков.

Ключевые слова: инфраструктурный объект, удаление, растительность, характеристики, видовое разнообразие, видовое богатство, доминирование видов, вегетативное размножение

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Платонов А. А. Оценка качественных и количественных характеристик нежелательной древесно-кустарниковой растительности / А. А. Платонов // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 180–193. – Библиогр.: с. 189–193 (25 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/12>.

Поступила 11.11.2022. *Пересмотрена* 02.12.2022. *Принята* 07.12.2022. *Опубликована онлайн* 15.05.2023

Article

Assessment of the species diversity of vegetation growing on the territories of linear infrastructure facilities in Central Russia

Alexey A. Platonov✉, paa7@rambler.ru,  0000-0003-4114-4636

Rostov State Transport University, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, 2, Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

Abstract

When form protective forest stands along linear infrastructure facilities, the problem of subsequent spontaneous reproduction of trees and shrubs arises, littering the territories of the above facilities and creating a threat to the safety of their operation. Works on cleaning the territories of infrastructure facilities from unwanted tree and shrub vegetation are often organized without a sufficiently clear idea of the characteristics of the said vegetation to be removed, which negatively affects the quality of the performance of these works. The purpose of the research is to determine the species composition of undesirable plant communities that form on the territories of linear infrastructure facilities in order to increase the efficiency of their removal and draw up recommendations for the proper maintenance of these territories. It was revealed that most types of undesirable vegetation growing on the territories of linear infrastructure facilities in the Central part of Russia belong to Magnoliophyta (flowering, about 97 %) and Pinophyta (gymnosperms, about 3 %). It was revealed that most types of undesirable vegetation growing on the territories of linear infrastructure facilities in the Central part of Russia belong to Magnoliophyta (flowering, about 97 %) and Pinophyta (gymnosperms, about 3 %). About 54 % of the protection zones of power lines and right of way of roads, as well as about 33 % of the right of way of railways in the Central part of Russia have a similar species composition of unwanted vegetation, however, the maximum similarity is not ensured by the location of sections of infrastructure facilities in close proximity to each other. For the protection zones of power lines, it is possible to determine the species composition of growing undesirable vegetation in one of these areas, followed by dissemination of the results of the study to another nearby area. For railroad right of way, such dissemination of the study results is inappropriate. In fact, on each of the sections of the right of way of roads and railways, as well as the routes of power transmission lines in Central Russia, such types of unwanted vegetation grow as ash-leaved maple (*Acer negundo* L., with a share of participation in the studied plant communities from 6.3 % to 98.1 %) and smooth elm (*Ulmus laevis* Pall, with a share of 1.1 % to 41.1 %). Among the types of unwanted trees and shrubs most expected to grow in these territories, about 36 % are prone to their renewal by stump growth, about 42 % – by root offspring, about 22 % – by other means. To increase the efficiency of removing unwanted vegetation in order to properly maintain the territories of infrastructure facilities, it is recommended to apply methods and methods that provide for either mechanical removal of the specified vegetation along with its roots (for example, its

uprooting), or a combined effect on it: removal of above-ground parts of vegetation in the fall with a mandatory subsequent spring herbicide treatment of emerging young stumps and root offspring.

Keywords: *infrastructure object, removal, vegetation, characteristics, species diversity, species richness, species dominance, vegetative propagation*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Platonov A.A. (2023). Results of assessment of qualitative and quantitative characteristics of unwanted tree and shrubs vegetation. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 180-193 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/12>.

Received 11.11.2022. *Revised* 02.12.2022. *Accepted* 07.12.2022. *Published online* 15.05.20223.

Введение

При формировании предприятиями лесопромышленного комплекса защитных лесных насаждений вдоль линейных инфраструктурных объектов (ЛИО) возникает проблема последующего самопроизвольного размножения деревьев и кустарников, захламляющих территории вышеуказанных объектов и создающих угрозу безопасности их функционирования. В процессе выполнении работ по очистке территорий ЛИО от нежелательной древесно-кустарниковой растительности (НДКР, под которой в данном исследовании нами понимались кустарник, подлесок и поросль) предприятия, ответственные за надлежащее содержание участков ЛИО в нормативно-техническом состоянии, задействуют в настоящее время более 50 различных технологических процессов [19]. Проведёнными нами ранее исследованиями было выявлено, что указанные работы осуществляются без предварительной оценки возможной эффективности применения того или иного технологического процесса ввиду отсутствия достаточно чётких представлений о качественных (например, видовой состав) характеристиках подлежащей удалению нежелательной растительности.

Отметим, что в настоящее время сведения о нежелательной растительности, произрастающей на территориях ЛИО, имеют весьма ограниченный характер [11], при этом исследования НДКР зачастую ведутся в направлениях, применительных к какой-либо конкретной технологии или разрабаты-

ваемой машине (механизму). Так, в исследованиях А.С. Васильева и В.М. Лукашевича [23] рассматриваются характеристики растительности для её удаления путём присоединяемого к лесной машине оборудования. В работе коллектива авторов [2] исследуются характеристики НДКР с целью наиболее эффективной её утилизации в качестве порубочных остатков. Ряд исследований Ф.К. Абдразакова [1, 13] посвящён изучению нежелательной растительности с точки зрения наиболее эффективного её угнетения химическими средствами. Аналогичной теме посвящены исследования М.М. Фаттахова [12], А.А. Котова [7] и С.А. Анисимова [3]. В некоторых работах Д.Ю. Дручинина [5, 6], А.Ф. Алябьева [8] и В.Е. Родионова [10] рассматриваются вопросы снижения энергоёмкости процесса ударного (в том числе – бесстружечного) резания нежелательной растительности.

Приведённый нами выше список авторов и их исследований, конечно же, не является исчерпывающим, однако достаточно наглядно характеризующим вышеозначенную направленность исследований нежелательного растительного покрова. При этом справедливости ради отметим, что мировой наукой предпринимаются попытки исследования совокупных параметров произрастающей на ряде объектов нежелательной растительности. В частности, выделим работы коллективов авторов из КНР, Польши и Франции, в которых рассматриваются вопросы мониторинга активности нежелательной растительности с использованием показа-

телей её состояния [18, 21], в том числе – применительно к одному виду НДСР, а именно – к робинии ложноакациевой [14, 22], а также научный труд иранских учёных [15], изучивших влияние трёх видов кустарников (*Amygdalus scoparia* Spach, *Ebenus stellata* Boissi *Daphne mezereum* L.) на характеристики почвы и растительности под их пологом в полузасушливых регионах. В трудах австралийских [17] и китайских [24, 25] учёных рассматриваются вопросы восстановления растительных сообществ на деградированных землях, а в ряде работ чешского коллектива авторов [16, 20] исследовано самопроизвольное восстановление растительного покрова вдоль автомобильных дорог Центральной Европы.

В связи с вышеизложенным заметим, что масштабных исследований нежелательной растительности до настоящего времени не проводилось. В частности, является неизученным видовой состав указанной растительности, получение сведений о котором имеет большую актуальность для теории и практики надлежащего содержания территорий линейных инфраструктурных объектов, а в целом дальнейшие исследования в области повышения эффективности и качества удаления НДСР должны быть направлены на выявление общих правил и закономерностей развития и формирования на территориях ЛИО нежелательных растительных сообществ.

Целью исследования является определение видового состава нежелательных растительных сообществ, формирующихся на территориях линейных инфраструктурных объектов, для повышения эффективности их удаления и составления рекомендаций по надлежащему содержанию указанных территорий.

Для реализации сформулированной цели исследований необходимо было решить следующие задачи:

1. Выявить и проанализировать таксационные показатели видов НДСР на принятых объектах исследования.

2. Определить доминирующие и наиболее ожидаемые к произрастанию виды нежелательной растительности, оценив возможности их вегетативного размножения.

Материалы и методы

Объектами исследования являлись участки ЛИО (полосы отвода автомобильных дорог; полосы отвода железных дорог; охранные зоны линий электропередачи, далее – трассы ВЛ, охранные зоны ЛЭП), расположенные в ряде областей Центральной части России от 52°51'с.ш. 35°06' в.д. на севере до 50°45'с.ш. 36°76' в.д. на юге и 51°32'с.ш. 39°28' в.д. на востоке. Основная часть территории исследования, представляющая собой типичную лесостепь, находится на Среднерусской возвышенности с отмечаемыми абсолютными высотами 150...300 м над уровнем моря. Предметом исследования являлась нежелательная древесно-кустарниковая растительность, произрастающая на территории 28 опытных участков ЛИО различной протяжённости, транспортной доступности, степени зарастания и с разной долей участия видов НДСР (рис. 1). Предварительно по каждому участку принималось решение о целесообразности выполнения на нём исследований (в том числе – по критерию наличия на его территории нежелательной растительности).

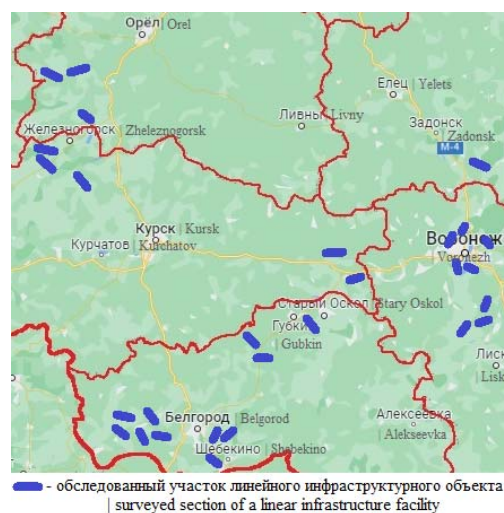


Рисунок 1. Схема расположения участков ЛИО

Figure 1. Scheme of location of LIO sites
(Источник: собственная разработка автора)

Source: own development of the author

Исследования проводились в весенне-летний период 2021 г. маршрутным методом. На основе анализа достоинств и недостатков различных мето-

дов учёта и контроля качественных и количественных характеристик произрастающей травянистой и древесно-кустарниковой растительности [4, 9], нами для исследования видового состава произрастающей по территориям ЛИО НДКР был выбран метод учётных площадок. В качестве учётной единицы использовали площадки постоянных размеров (для трасс ВЛ – круговую, площадью $S = 1 \text{ м}^2$; в иных случаях – прямоугольную, площадью $S = 0,5 \text{ м}^2$). Все работы проводились в соответствии с классическими (ОСТ 56-69-83) требованиями к таксационно-лесоводственным исследованиям, а также действующими нормативными материалами в части безопасности выполнения работ на объектах инфраструктуры. На каждой учётной площадке методом сплошного пересчёта определяли количество экземпляров НДКР и её видовую принадлежность. После сбора экспериментальных данных для изучения сходства исследуемой нежелательной флоры, произрастающей по территориям ЛИО, применялся коэффициент Чекановского, учитывающий относительную численность видов:

$$K_{Ch} = \sum_{i=1}^{n,k} \min(f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{n1}, f_{k2}) \quad (1)$$

где $f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{n1}, f_{k2}$ – доли численности каждого i -го вида нежелательной растительности на одной (индекс «1») и другой (индекс «2») обследуемых (и взаимно сравниваемых) территориях при общем количестве указанных видов для данных территорий, равно соответственно n и k .

Видовое разнообразие нежелательной растительности оценивалось при помощи индексов видового богатства Маргалефа D_{Mg} и Менхиника D_{Mn} , а также индекса видового разнообразия Шеннона H_{Sh} . Для определения доминирования какого-либо i -го вида НДКР нами использовался индекс Паляя-Ковнацки:

$$D_{PK} = 100 \cdot p_i \cdot n_{ндкр\ i} / N_{ндкр}, \% \quad (2)$$

где $n_{ндкр\ i}$ – количество экземпляров нежелательной растительности i -го вида; p_i – встречаемость вида ($p_i = m_{yni} / N_{yn}$, где m_{yni} – количество учётных площадок, на территории которых был найден i -й вид, N_{yn} – общее количество учётных площадок); $N_{ндкр}$ – общее количество особей всех $S_{ндкр}$ видов НДКР.

Для оценки достоверности проведённых исследований обработка полученного массива данных

проводилась с использованием программного пакета для статистического анализа Statistica StatSoft Russia.

Результаты и обсуждение

В результате маршрутного обследования принятых в исследование территорий ЛИО общее количество выявленных экземпляров кустарника, подлеска и поросли составило более 13750 штук. Показатели центра распределения количества экземпляров НДКР, выявленных на одной учётной площадке, для участков полос отвода автомобильной дороги Нижняя Ведуга – Тербуны (Воронежская обл., протяжённостью $L = 2120 \text{ м}$ с количеством выявленных видов $S_{ндкр} = 5$), полосы отвода железной дороги Белгород – Нежеголь1 (Белгородская обл., $L = 2580 \text{ м}$, $S_{ндкр} = 10$) и охранной зоны линии электропередачи ПС Быково – ПС Удобное (Курская обл., $L = 5450 \text{ м}$, $S_{ндкр} = 6$) представлены соответственно на рис. 2, а, б, в.

Ввиду различной протяжённости участков ЛИО для осуществления статистических исследований полученного объёма выборочных данных нами было выполнено приведение количества экземпляров $K_{ндкр}$ нежелательной растительности по отдельным территориям инфраструктурных объектов к 1 га, показатели центра распределения которых показаны на рис. 2, д. Выявлено, что для показателя $K_{ндкр}$ коэффициент вариации v находится в пределах $30 < 58,22 < 70 \%$ (умеренная вариация), значения коэффициента асимметрии $As = 0,647$ и эксцесса $Ex = -0,403$ мало отличаются от нуля, поэтому можно предположить близость данной выборки к нормальному распределению.

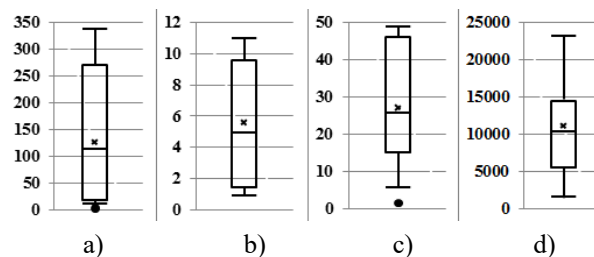


Рисунок 2. Показатели центра распределения для участков ЛИО

Figure 2. Indicators of distribution centers for LIO plots

(Источник: собственная разработка автора)

Source: own development of the author

Проверка гипотезы о нормальном распределении показателя $K_{ндкр}$ по критерию согласия Пирсона ($K_{набл} = 4,86 < K_{кр} = 5,991$) показала, что нет оснований отвергать данную гипотезу. С вероятностью 0.95 можно утверждать, что среднее значение показателя $K_{ндкр}$ при выборке большего объёма не выйдет за пределы доверительного интервала 5972,806...14987,169.

В целом при обследовании территорий ЛИО были выявлены 36 видов НДКР, относящиеся по систематике растений (рис. 3, где N_{sm} – количество элементов данной Систематики) к двум отделам (Magnoliophyta: цветковые, 35 видов, 97.2 % от общего количества; Pinophyta, голосеменные, 1 вид, 2.8 %) и к двум классам (Magnoliopsida, двудольные; Pinopsida, хвойные).

Подавляющее преимущество произрастающих нежелательных цветковых растений над голосеменными (фактически – хвойными, в качестве единственного представителя – Сосна обыкновенная) объясняется тем, что исследования проводились в лесостепной зоне с наличием в непосредственной близости (0,5...1 м) или в некотором отдалении смешанных и широколиственных лесов (в том числе – искусственных, в том числе – так называемых «посадок», формирующих границы вышеуказанных защитных лесных насаждений или сельскохозяйственных угодий).

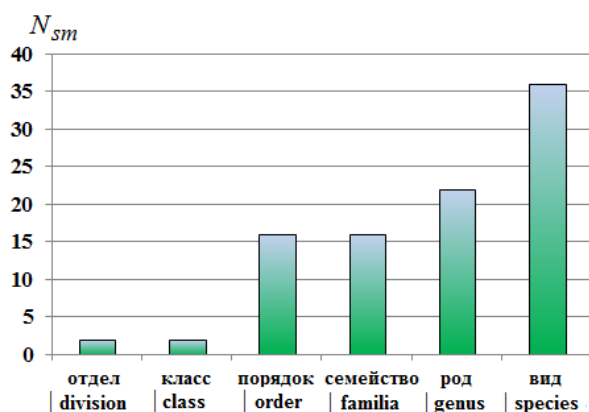


Рисунок 3. Распределение видов НДКР по элементам систематики растений

Figure 3. Distribution of unwanted vegetation species by plant taxonomy elements

(Источник: собственная разработка автора)

Source: own development of the author

Принимая во внимание то, что сравнение локальных флор, произрастающих на территориях с различными характеристиками (в частности – количество почвенных частиц, априори, по полосам отвода железных дорог меньше, чем по охранным зонам трасс ВЛ и полосам отвода автомобильных дорог), не обеспечит получение адекватного результата, нами выполнялось сравнение видового разнообразия нежелательной растительности по отдельности для указанных типов ЛИО.

Для охранных зон линий электропередачи видовое разнообразие НДКР варьируется в диапазоне $K_{Ch} = 0,257...0,7699$. Количество трасс ВЛ с видовым разнообразием $K_{Ch} > 75\%$ составило 1.1 %, с видовым разнообразием $50\% < K_{Ch} \leq 75\%$ – 53.8 %, с видовым разнообразием $40\% < K_{Ch} \leq 50\%$ – 20.9 %, с видовым разнообразием $30\% < K_{Ch} \leq 40\%$ – 22 %, с видовым разнообразием $K_{Ch} \leq 30\%$ – 2.2 %. Среднее значение $\bar{K}_{Ch} = 0.508 \pm 0.0299$, из чего следует вывод, что более половины охранных зон ЛЭП обладают схожим видовым составом НДКР, а именно: вязом гладким, клёном ясенелистным, сливой колочей, шиповником майским и клёном татарским, нежелательное произрастание которых было выявлено нами на более чем 50 % всех обследованных участков охранных зон линий электропередачи (рис. 4, а).

Для полос отвода железных дорог видовое разнообразие НДКР варьируется в диапазоне $K_{Ch} = 0,0723...0,7473$. Количество рассматриваемых участков с видовым разнообразием $K_{Ch} > 75\%$ составило 0 %, с видовым разнообразием $50\% < K_{Ch} \leq 75\%$ – 33 %, с видовым разнообразием $40\% < K_{Ch} \leq 50\%$ – 17.6 %, с видовым разнообразием $30\% < K_{Ch} \leq 40\%$ – 16.5 %, с видовым разнообразием $K_{Ch} \leq 30\%$ – 32.9 %, из чего следует вывод, что лишь около трети полос отвода железных дорог обладают схожим видовым составом НДКР, а именно: клёном ясенелистным, вязом гладким, вязом приземистым, тополем чёрным, ясенем обыкновенным, клёном остролистным, сосной обыкновенной, тополем итальянским, вязом граболистным и клёном татарским, нежелательное произрастание которых было выявлено нами на более чем 50 % всех обследованных участков полос отвода железных дорог (рис. 4, б). Среднее значение рассматриваемого

коэффициента для полос отвода железных дорог составило величину $\bar{K}_{Ch} = 0.409 \pm 0.0405$, что также указывает на недостаточную схожесть видового состава НДКР по участкам полос отвода железных дорог.

Сравнением величин коэффициента Чекановского K_{Ch} нами было установлено, что максимальная схожесть видового состава НДКР не обеспечивается расположением участков ЛИО в непосредственной близости друг относительно друга. Однако, при этом для трасс ВЛ возможно определение видового состава произрастающей нежелательной растительности на одном из таких участков с последующим распространением результатов исследования на другой участок ЛИО. Для полос отвода железных дорог подобное распространение резуль-

татов исследования по расположенным близ друг относительно друга участкам нам представляется нецелесообразным.

В среднем на каждом из исследованных участков полос отвода железных дорог встречается 11 видов нежелательной растительности, при этом около 64 % участков имеют на своей территории 10 и более видов произрастающей НДКР, около 92 % – более 6 видов произрастающей НДКР. Среднее значение индекса видового богатства Маргалёфа составило $\bar{D}_{Mg} = 1.68 \pm 0.442$, индекса Менхиника $\bar{D}_{Mn} = 0.461 \pm 0.14$, индекса Шеннона $\bar{H}_{Sh} = 1.719 \pm 0.362$.

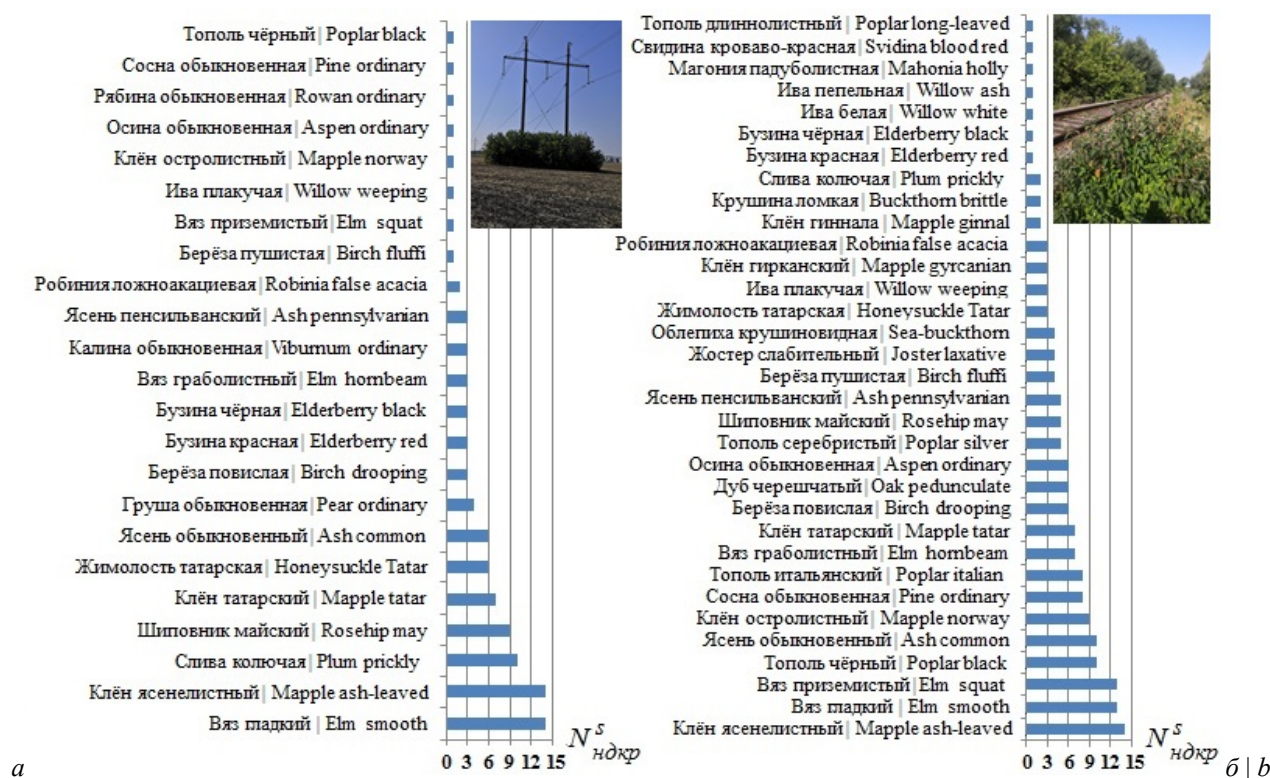


Рисунок 4. Распределение количества видов НДКР по участкам:

а) охраняемых зон линий электропередачи; б) полос отвода железных дорог

Figure 4. Distribution of the number of types of unwanted vegetation by sections:

а) of protected zones of power lines; б) of railway right of way

Источник: собственная разработка автора

Source: own development of the author

Для охраняемых зон ЛЭП около 78 % участков имеют на своей территории 8 и менее видов произ-

растающей НДКР, около 50 % – 6 и менее видов, при этом среднее значение индекса видового богат-

ства Маргалефа составило $\bar{D}_{Mg} = 1.649 \pm 0.311$, индекса Менхеника $\bar{D}_{Mn} = 1.136 \pm 0.201$, индекса Шеннона $\bar{H}_{Sh} = 1.76 \pm 0.148$.

Анализ результатов определения доминирования видов НДКР, произрастающей на исследованных участках ЛИО, показал следующее.

Фактически на каждом из принятых в исследование участков ЛИО нами были выявлены такие виды нежелательной растительности, как Клён ясенелистный (*Acer negundo* L., с долей участия в исследуемых растительных сообществах от 6,3 % до 98,1 %) и Вяз гладкий (*Ulmus laevis* Pall, с долей участия от 1,1 % до 41,1 %).

Несомненным доминантным видом ($10 < D_{PK} < 100$) нежелательной древесно-кустарниковой растительности, произрастающей в полосах отвода железных дорог, является Клён ясенелистный с общим индексом доминирования $D_{PK} = 11,9495$. Вторым по доминированию видом НДКР, произрастающим в полосах отвода железных дорог, является вяз приземистый (*Ulmus pumila* L.), отмеченный нами практически на всех (92,8 %) приня-

тых в исследование участках с общим индексом доминирования $D_{PK} = 2,2012$.

Несомненным субдоминантным видом ($1 < D_{PK} < 10$) нежелательной древесно-кустарниковой растительности, произрастающей в охранных зонах линий электропередачи, является Клён ясенелистный, отмеченный нами на всех без исключения принятых в исследование участках с общим индексом доминирования $D_{PK} = 6,7841$. Вторым по доминированию видом НДКР является вяз гладкий, отмеченный нами на всех принятых в исследование участках с общим индексом доминирования $D_{PK} = 3,7262$.

Принимая во внимание выявленные нами величины встречаемости видов НДКР по исследованным участкам ЛИО, нам представляется возможным сделать следующий вывод: в полосах отвода автомобильных дорог, охранных зонах ЛЭП и в полосах отвода железных дорог в большей степени следует ожидать произрастания видов нежелательной древесно-кустарниковой растительности (в порядке убывания их встречаемости и доминирования), отмеченных в табл. 1.

Таблица 1

Наиболее ожидаемые к произрастанию виды нежелательной древесно-кустарниковой растительности, встречающиеся на территориях линейных инфраструктурных объектов Центральной части России

Table 1

The most common types of unwanted trees and shrubs found on the territories of linear infrastructure facilities in the Central part of Russia

Линейный инфраструктурный объект Linear infrastructure object	Виды нежелательной растительности Types of unwanted vegetation
полосы отвода автомобильных дорог, охранные зоны линий электропередачи road right of way, protection zones of power lines	Клён ясенелистный, Вяз гладкий, Шиповник майский, Слива колючая, Ясень обыкновенный, Клён татарский, Жимолость татарская Ash-leaved maple, Smooth elm, May rosehip, Prickly plum, Common ash, Tatar maple, Honeysuckle Tatar
полосы отвода железных дорог railway right of way	Клён ясенелистный, Вяз приземистый, Ясень обыкновенный, Клён остролистный, Тополь итальянский, Тополь чёрный, Вяз гладкий, Клён татарский, Сосна обыкновенная Ash-leaved maple, Squat elm, Common ash, Norway maple, Italian poplar, Black poplar, Smooth elm, Tatar maple, Scots pine

Источник – собственная разработка автора

Source – author's own development

Анализ элементов ботанического описания видов НДКР, встречающихся на территориях ЛИО Центральной России, позволил установить следующее (рис. 5).

Около 36 % всех выявленных нами видов имеют склонность к последующему (после их удаления, например, срезанием) возобновлению пневой порослью, около 42 % – возобновлению корневыми отпрысками и около 22 % – возобновлению иными способами (например, семенами). В тоже время среди наиболее ожидаемых к произрастанию (табл. 1) видов нежелательной растительности в полосах отвода автомобильных дорог и охранных зонах ЛЭП склонны к возобновлению пневой порослью около 43 % видов при полном отсутствии наиболее ожидаемых к произрастанию видов НДКР, возобновляемых иным (кроме корневых отпрысков: около 57 %) способами. Аналогично в полосах отвода железных дорог более половины (около 55 %) наиболее ожидаемых к произрастанию видов НДКР склонны к возобновлению пневой порослью, 33 % – корневыми отпрысками, и лишь

11 % (а фактически – лишь один вид: Сосна обыкновенная) склонны к возобновлению семенами. Выявленное распределение видов нежелательной растительности по возможностям их вегетативного размножения указывает на нежелательность и общую неэффективность технологических процессов удаления НДКР с территорий ЛИО, предусматривающих оставление в почве корневых систем указанной растительности.

Целесообразно, на наш взгляд применять способы и методы очистки территорий линейных инфраструктурных объектов от нежелательной растительности (кустарника, подлеска и поросли), предусматривающие либо механическое удаление вышеозначенной нежелательной растительности вместе с корнями (например, её вырывание), либо комбинированное воздействие на НДКР: удаление надземных частей растительности осенью с обязательной последующей весенней обработкой гербицидами появившейся молодой пневой поросли и корневых отпрысков.

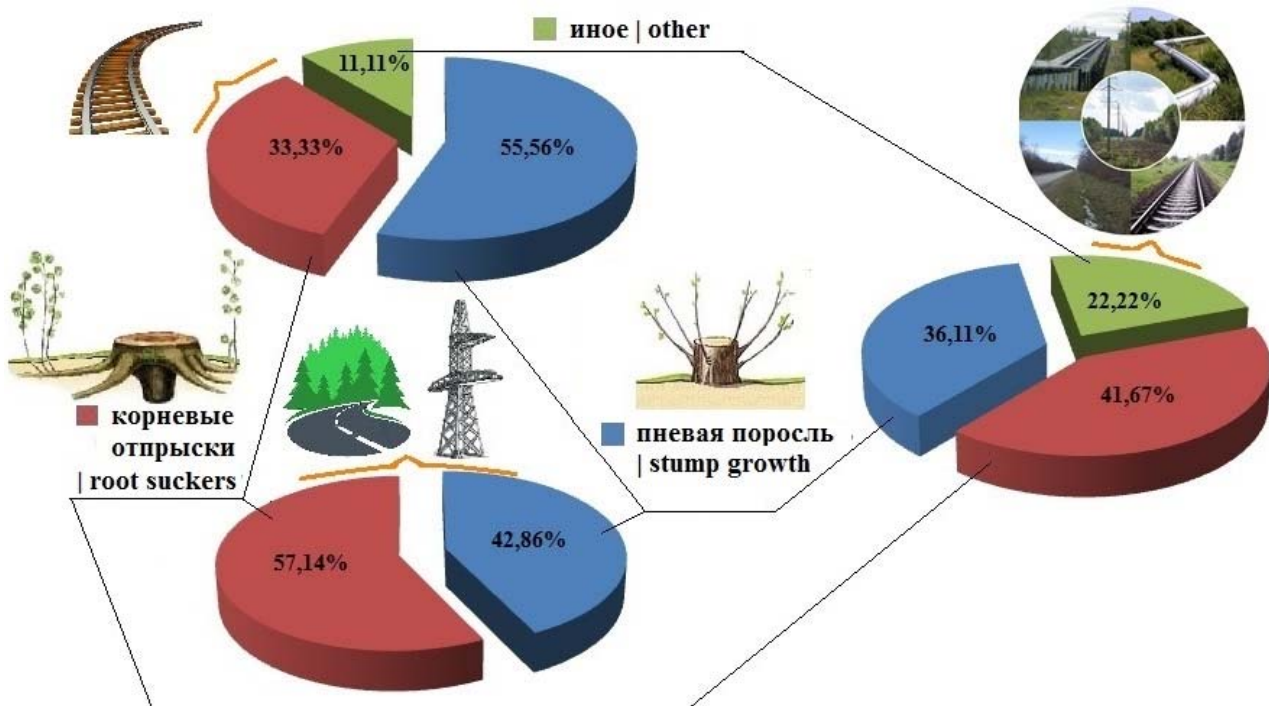


Рисунок 5. Распределение видов нежелательной растительности по возможностям их вегетативного размножения

Figure 5. Distribution of undesirable vegetation species according to their vegetative reproduction possibilities

Источник: собственная разработка автора

Source: own development of the author

Выводы

1. Исследования в области повышения эффективности и качества удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности, произрастающей на территориях линейных инфраструктурных объектов, должны быть направлены на выявление общих правил и закономерностей развития и формирования на указанных территориях нежелательных растительных сообществ.

2. Впервые выявлено, что большинство видов НДКР, произрастающей на территориях линейных инфраструктурных объектов, относятся к Magnoliophyta (цветковые, около 97 %), около 3 % – к Pinophyta (голосеменные).

3. Установлено, что около 54 % охранных зон ЛЭП и полос отвода автомобильных дорог, а также около 33 % полос отвода железных дорог Центральной части России обладают схожим видовым составом НДКР.

4. Определено, что максимальная схожесть видового состава нежелательной растительности не обеспечивается расположением участков ЛИО в непосредственной близости друг относительно друга. Для трасс ВЛ возможно определение видового состава произрастающей нежелательной растительности на одном из таких участков с последующим распространением результатов исследования на другой участок ЛИО. Для полос отвода железных дорог подобное распространение результатов исследования нецелесообразно.

5. Показано, что фактически на каждом из участков линейных инфраструктурных объектов (а именно – полос отвода железных дорог, трасс линий электропередачи и полос отвода автомобильных дорог) произрастают такие виды нежелательной растительности, как Клён ясенелистный (*A. negundo* L., с долей участия в исследуемых растительных сообществах от 6,3 % до 98,1 %) и Вяз гладкий (*U. laevis* Pall, с долей участия от 1,1 % до 41,1 %).

6. Установлено, что среди наиболее ожидаемых к произрастанию на территориях ЛИО видов нежелательной древесно-кустарниковой растительности около 36 % склонны к своему возобновлению пневой порослью, около 42 % – корневыми отпрысками, около 22 % – иными способами.

7. Для повышения эффективности удаления НДКР на территориях ЛИО в целях надлежащего содержания указанных территорий рекомендовано применять способы и методы, предусматривающие либо механическое удаление нежелательной растительности вместе с корнями (например, её вырывание), либо комбинированное воздействие на НДКР: удаление надземных частей растительности осенью с обязательной последующей весенней обработкой гербицидами появившейся молодой пневой поросли и корневых отпрысков.

Список литературы

1. Абдразаков Ф.К., Чуркина К.И. Оценка агротехнических и гидравлических характеристик распыла при работе различных типов щелевых распылителей. Аграрный научный журнал. 2022;4:70-75. DOI: 10.28983/asj.y2022i4pp70-75

2. Алтынникова Е.Е., Бегунов А.А., Руссавская Н.В., Кашковский В.В. Многофакторный анализ в принятии управленческих решений по утилизации порубочных остатков вдоль полосы отвода железных дорог. Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020;3(67):90-100. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).90-100

3. Анисимов С.А., Горюнов Д.Г., Карпова О.В., Панкин К.Е. Результаты исследования устройства, подавляющего нежелательную растительность вдоль линейных объектов для обеспечения их безопасной эксплуатации. Аграрный научный журнал. 2022;3:82-85. DOI: 10.28983/asj.y2022i3pp82-85

4. Багинский В.Ф. Лесная таксация. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2018. 365 с. ISBN 978-985-434-800-1
Режим доступа: <https://elib.gsu.by/handle/123456789/28944>

5. Дручинин Д.Ю., Агупов Е.В. Механизация работ по удалению нежелательной растительности при выращивании лесных культур. Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2020;8(3):197-202. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44561187>
6. Дручинин Д.Ю., Гнусов М.А., Бородин Н.А., Миляев А.С., Воскобойник М.Ю. Развитие исследований силового резания древесины корней саженцев лезвием рабочего органа выкопчного оборудования. Лесотехнический журнал. 2021;11(1):111-122. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/10
7. Котов А.А., Алябьев А.Ф. Исследование экологической безопасности уничтожения нежелательной древесной растительности химическим методом. Лесной вестник. ForestryBulletin. 2017;21(4):19-24. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-19-24
8. Котов А.А., Алябьев А.Ф. Результаты экспериментальных исследований упругих свойств нежелательной древесной растительности. Техника и оборудование для села. 2017;8:28-31. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30040703>
9. Минаев В.Н., Леонтьев Л.Л., Ковязин В.Ф. Таксация леса. – СПб: Лань, 2022. – 240 с. – ISBN 978-5-507-44722-0 Режим доступа: <https://7books.ru/l-leontev-v-kovyzin-v-minaev-taksaciya-lesa-978-5-8114-5134-0/>
10. Родионов В.Е., Дербин В.М., Дербин М.В., Удальцов В.Н. Силовой расчет ножей с криволинейными режущими кромками для резания древесины. Системы. Методы. Технологии. 2017;2(34):121-128. DOI: 10.18324/2077-5415-2017-2-121-128
11. Тунякин В.Д., Рыбалкина Н.В., Шеншин Л.М. Лесообразовательный процесс в предельно узкой полевосащитной лесной полосе. Лесотехнический журнал. 2022;12(2):56-67. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/5
12. Фаттахов М.М., Фатыхова А.М., Шаяхметов Р.З., Дроздов А.Д. Химические средства для борьбы с растительностью на автомобильных дорогах. Наука и техника в дорожной отрасли. 2021;1:33-36. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46562877>
13. Abdrazakov F.K., Churkina C.I., Logashov D.V. Advanced technology for the removal of trees and shrubs on the berms of irrigation canals using the oppression of stumps with chemicals. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021;723:042024. DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042024
14. Dyderski, M.K., Jagodziński, A.M. How do invasive trees impact shrub layer diversity and productivity in temperate forests? Annals of Forest Science. 2021;78:20. DOI: 10.1007/s13595-021-01033-8
15. Erfanzadeh R., Yazdani M., Arani A.M. Effect of different shrub species on their sub-canopy soil and vegetation properties in semiarid regions. Land Degradation and Development. 2021;32(11):3236-3247. DOI: 10.1002/ldr.3977
16. Janečkova P., Řehouňkova K., Vítovcova K., Šebelíkova L., Prach K. Spontaneous succession on road verges – An effective approach with minimum effort. Land Degradation and Development. 2021;32(9):2726-2734. DOI: 10.1002/ldr.3949
17. Inman E.N., Hobbs R.J., Valentine L., Tsvuura Z. Current vegetation structure and composition of woody species in community-derived categories of land degradation in a semiarid rangeland in Kunene region, Namibia. Land Degradation and Development. 2020;31(18):2996-3013. DOI: 10.1002/ldr.3688
18. Pei F., Wu C., Liu X., Yang K., Zhou Y., Wang K., Xu L., Xia G., Li X. Monitoring the vegetation activity in china using vegetation health indices. Agricultural and Forest Meteorology. 2018;248:215-227. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.10.001
19. Platonov A.A. Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation. Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin. 2021;25(1):115-122. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122
20. Šebelíkova L., Csicssek G., Kirmer A., Vítovcova K., Ortmann-Ajkai A., Prach K., Řehouňkova K. Spontaneous revegetation versus forestry reclamation – Vegetation development in coal mining spoil heaps across Central Europe. Land Degradation and Development. 2019;30(3):348-356. DOI: 10.1002/ldr.3233

21. Schmitt A., Trouvé R., Seynave I. et al. Decreasing stand density favors resistance, resilience, and recovery of *Quercus petraea* trees to a severe drought, particularly on dry sites. *Annals of Forest Science*. 2020;77:52. DOI: 10.1007/s13595-020-00959-9
22. Toillon J., Priault P., Dallé E., Marron N., Brignolas F., Bodineau G., Bastien J.-C. Early effects of two planting densities on growth dynamics and water-use efficiency in *Robinia pseudoacacia* L. and *Populus deltoides* (bartr. ex marsh.) × *P. nigra* L. short rotation plantations. *Annals of Forest Science*. 2021;78:73. DOI: 10.1007/s13595-021-01087-8
23. Vasilev A.S., Lukashevich V.M. Attached equipment to forest machine for combating unwanted vegetation. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2022;8(4):853-862. Режим доступа: http://procedia-esem.eu/pdf/issues/2021/no4/15_Vasilev_21.pdf
24. Wang H., Huang S., Zhang S. et al. Localized neighborhood species mingling is correlated with individual tree size inequality in natural forests in South China. *Annals of Forest Science*. 2021;78:102. DOI: 10.1007/s13595-021-01111-x
25. Zihao M., Jiahong G., Weiming L., Zhaoyang C., Shixiong C. Regional differences in the factors that affect vegetation cover in China. *Land Degradation and Development*. 2021;32:1961. DOI: 10.1002/ldr.3847

References

1. Abdrazakov F.K., Churkina K.I. Otsenka agrotekhnicheskikh i gidravlicheskh kharakteristik raspyla pri rabote razlichnykh tipov shchelevykh raspyliteley [Evaluation of agrotechnical and hydraulic characteristics of the spray during the operation of various types of slotted sprayers]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian scientific journal*. 2022;4:70-75. (In Russ.) DOI: 10.28983/asj.y2022i4pp70-75
2. Altynnikova E.E., Begunov A.A., Russavskaya N.V., Kashkovsky V.V. Mnogofaktornyy analiz v prinyatii upravlencheskikh resheniy po utilizatsii porubochnykh ostatkov vdol' polosy otvoda zheleznykh dorog [Multivariate analysis in making managerial decisions on the disposal of logging residues along the right of way of railways]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye = Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2020;3(67):90-100. (In Russ.) DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).90-100
3. Anisimov S.A., Goryunov D.G., Karpova O.V., Pankin K.E. Rezul'taty issledovaniya ustroystva, podavlyayushchego nezhelatel'nuyu rastitel'nost' vdol' lineynykh ob'yektov dlya obespecheniya ikh bezopasnoy ekspluatatsii [Results of a study of a device that suppresses unwanted vegetation along linear objects to ensure their safe operation]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian scientific journal*. 2022;3:82-85. (In Russ.) DOI: 10.28983/asj.y2022i3pp82-85
4. Baginsky V.F. Forest taxation. Gomel, GSU im. F. Skorina, 2018, 365 p. (In Russ.). URL: <https://elib.gsu.by/handle/123456789/28944>
5. Druchinin D.Yu., Agupov E.V. Mekhanizatsiya rabot po udaleniyu nezhelatel'noy rastitel'nosti pri vyrashchivanii lesnykh kul'tur [Mechanization of work to remove unwanted vegetation when growing forest crops]. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika = Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2020;8(3):197-202. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44561187>
6. Druchinin D.Yu., Gnusov M.A., Borodin N.A., Milyaev A.S., Voskoboinik M.Yu. Razvitiye is-sledovaniy silovogo rezaniya drevesiny korney sazhentsev lezviyem rabocheho organa vykopnochnogo oborudovaniya [Development of research on the power cutting of wood roots of seedlings with a blade of the working body of digging equipment]. *Lesotekhnicheskyy zhurnal = Forest Engineering Journal*. 2021;11(1):111-122. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/10
7. Kotov A.A., Alyabiev A.F. Issledovaniye ekologicheskoy bezopasnosti unichtozheniya nezhele-tel'noy drevesnoy rastitel'nosti khimicheskim metodom [Study of the environmental safety of the destruction of unwanted woody vegetation by a chemical method]. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*. 2017;21(4):19-24. (In Russ.). DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-19-24

8. Kotov A.A., Alyabiev A.F. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy uprugikh svoystv nezhelatel'noy drevesnoy rastitel'nosti [Results of experimental studies of the elastic properties of undesirable woody vegetation]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela = Machinery and equipment for the village*. 2017;8:28-31. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30040703>
9. Minaev V.N., Leontiev L.L., Kovyazin V.F. Forest inventory. St. Petersburg, Lan, 2022, 240 p. (In Russ.). URL: <https://7books.ru/l-leontev-v-kovyazin-v-minaev-taksaciya-lesa-978-5-8114-5134-0/>
10. Rodionov V.E., Derbin V.M., Derbin M.V., Udaltsov V.N. Silovoy raschet nozhey s krivo-lineynymi rezhushchimi kromkami dlya rezaniya drevesiny [Power calculation of knives with curved cutting edges for cutting wood]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technology*. 2017;2(34):121-128. (In Russ.). DOI: 10.18324/2077-5415-2017-2-121-128
11. Tunyakin V.D., Rybalkina N.V., Shenshin L.M. Lesoobrazovatel'nyy protsess v predel'no uzkoj polezashchitnoy lesnoy polose [Forest formation process in an extremely narrow field-protective forest belt]. *Lesotekhnicheskij zhurnal = Forest Engineering Journal*. 2022;12(2):56–67. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/5
12. Fattakhov M.M., Fatykhova A.M., Shayakhmetov R.Z., Drozdov A.D. Khimicheskiye sredstva dlya bor'by s rastitel'nost'yu na avtomobil'nykh dorogakh [Chemical agents for the control of vegetation on highways]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli = Science and technology in the road industry*. 2021;1:33-36. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46562877>
13. Abdrazakov F.K., Churkina C.I., Logashov D.V. Advanced technology for the removal of trees and shrubs on the berms of irrigation canals using the oppression of stumps with chemicals. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2021;723:042024. DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042024
14. Dyderski, M.K., Jagodziński, A.M. How do invasive trees impact shrub layer diversity and productivity in temperate forests? *Annals of Forest Science*. 2021;78:20. DOI: 10.1007/s13595-021-01033-8
15. Erfanzadeh R., Yazdani M., Arani A.M. Effect of different shrub species on their sub-canopy soil and vegetation properties in semiarid regions. *Land Degradation and Development*. 2021;32(11):3236-3247. DOI: 10.1002/ldr.3977
16. Janečkova P., Řehouňková K., Vítovcová K., Šebelíková L., Prach K. Spontaneous succession on road verges – An effective approach with minimum effort. *Land Degradation and Development*. 2021;32(9):2726-2734. DOI: 10.1002/ldr.3949
17. Inman E.N., Hobbs R.J., Valentine L., Tsvuura Z. Current vegetation structure and composition of woody species in community-derived categories of land degradation in a semiarid rangeland in Kunene region, Namibia. *Land Degradation and Development*. 2020;31(18):2996-3013. DOI: 10.1002/ldr.3688
18. Pei F., Wu C., Liu X., Yang K., Zhou Y., Wang K., Xu L., Xia G., Li X. Monitoring the vegetation activity in china using vegetation health indices. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018;248:215-227. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.10.001
19. Platonov A.A. Modern state of technical means to remove uncontrolled vegetation. *Lesnoy Vestnik. Forestry Bulletin*. 2021;25(1):115-122. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-115-122
20. Šebelíková L., Csicssek G., Kirmer A., Vítovcová K., Ortmann-Ajkai A., Prach K., Řehouňková K. Spontaneous revegetation versus forestry reclamation – Vegetation development in coal mining spoil heaps across Central Europe. *Land Degradation and Development*. 2019;30(3):348-356. DOI: 10.1002/ldr.3233
21. Schmitt A., Trouvé R., Seynave I. et al. Decreasing stand density favors resistance, resilience, and recovery of *Quercus petraea* trees to a severe drought, particularly on dry sites. *Annals of Forest Science*. 2020;77:52. DOI: 10.1007/s13595-020-00959-9
22. Toillon J., Priault P., Dallé E., Marron N., Brignolas F., Bodineau G., Bastien J.-C. Early effects of two planting densities on growth dynamics and water-use efficiency in *Robinia pseudoacacia* L. and *Populus deltoides*

(bartr. ex marsh.) × *P. nigra* L. short rotation plantations. *Annals of Forest Science*. 2021;78:73. DOI: 10.1007/s13595-021-01087-8

23. Vasilev A.S., Lukashevich V.M. Attached equipment to forest machine for combating unwanted vegetation. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2022;8(4):853-862. (In Russ.). URL: http://procedia-esem.eu/pdf/issues/2021/no4/15_Vasilev_21.pdf

24. Wang H., Huang S., Zhang S. et al. Localized neighborhood species mingling is correlated with individual tree size inequality in natural forests in South China. *Annals of Forest Science*. 2021;78:102. DOI: 10.1007/s13595-021-01111-x

25. Zihao M., Jiahong G., Weiming L., Zhaoyang C., Shixiong C. Regional differences in the factors that affect vegetation cover in China. *Land Degradation and Development*. 2021;32:1961. DOI: 10.1002/ldr.3847.

Сведения об авторе

✉ *Платонов Алексей Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 344038, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4114-4636>, e-mail: raa7@rambler.ru.

Information about the author

✉ *Aleksey A. Platonov* – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Rostov State Transport University, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia, 2, Rostov-on-Don, Russian Federation, 344038, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4114-4636>, e-mail: raa7@rambler.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/13>

УДК 630.51 : 624.014



Оценка надежности металлоконструкций подъемно-транспортных машин лесного комплекса с учетом усталостной прочности материала

Алина В. Попикова¹✉, poalinka@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-9387-4254>

Андрей В. Колюхов¹, akoniukhov@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-1828-3673>

Сергей К. Попиков², sergpopikov@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

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

²ООО "ИКПАД" – Институт комплексного проектирования автомобильных дорог, ул. Депутатская, 11, г. Воронеж, 394055, Российская Федерация

В настоящее время в лесном комплексе условия работы подъемно-транспортных машин (ПТМ): самоходных лесопогрузчиков манипуляторного типа характеризуются интенсивными технологическими нагрузками, высокими скоростями подъема и перемещения грузов, при этом не всегда обеспечиваются требуемые ресурсные характеристики. Долговечность ПТМ в основном определяется долговечностью несущей металлоконструкции. Приведен анализ различных методик оценки надежности металлоконструкций ПТМ с учетом усталостной прочности материала. Установлено, что одним из способов проектирования конструкций с минимальной массой является повышение расчетных сопротивлений материалов, однако коэффициент запаса является неудобным для оценивания готовности конструкции к эксплуатации. Необходимо создание более универсального критерия – вероятности отказа. Целью работы является разработка методики и алгоритма количественной оценки вероятности безопасной работы металлоконструкции с учетом снижения несущей способности. Для исследования показателей усталостной прочности подкрановых балок машин лесного комплекса и факторов, оказывающих на нее влияние, рассмотрен кран грузоподъемности 32/5 т. Произведен расчет на усталостную прочность металлоконструкции крана. Количество циклов нагружения при режиме работы 3К по истечении срока 5 лет составляет $N = 3,0 \cdot 10^5$. При используемом материале сталь С255 (ГОСТ 27772-88) с временным сопротивлением $R_{un} = 380$ МПа, и расчетным сопротивлением усталости R_v , принимаемым в зависимости от временного сопротивления стали R_{un} , следовательно, $R_v = 120$ МПа, усталостная прочность составила для различных временных промежутков 5-50 лет от 328,88 МПа до 167,98 МПа. Получены расчетные зависимости коэффициента безопасности от времени эксплуатации крана грузоподъемностью 32/5 т в зависимости от режима работы крана от 7,9 до 2,01. Полученные результаты могут использоваться при проектировании металлоконструкций ПТМ лесного комплекса, а также в строительстве и сельском хозяйстве.

Ключевые слова: лесные машины, металлоконструкция, динамические нагрузки, краны, манипуляторы, прочность, усталость, надежность

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: Авторы выражают признательность научному руководителю профессору кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ, доктору технических наук Попикову Петру Ивановичу за оказанную помощь в подготовке материалов. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: Авторы статьи заявляют об отсутствии личных, коммерческих, идеологических, интеллектуальных конфликтов интересов при подготовке и написании рукописи.

Для цитирования: Попикова А. В. Оценка надежности металлоконструкций подъемно-транспортных машин лесного комплекса с учетом усталостной прочности материала / А. В. Попикова, А. В. Конюхов, С. К. Попиков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 194–208. – Библиогр.: с. 204–207 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/13>.

Поступила 06.02.2023. *Пересмотрена* 12.03.2023. *Принята* 21.03.2023. *Опубликована онлайн* 15.05.2023.

Article

Assessment of the reliability of metal structures of lifting and transport machines of the forest complex, taking into account the fatigue strength of the material

Alina V. Popikova¹✉, poalinka@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-9387-4254>

Andrey V. Konyukhov¹, akoniukhov@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-1828-3673>

Sergei K. Popikov², sergpopikov@mail.ru  <https://orcid.org/0009-0009-1176-9804>

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

²*Institute of Integrated Highway Design, LLC, Deputatsky str., Voronezh, 394055, Russian Federation*

Abstract

Currently, in the forest complex, the working conditions of lifting and transport machines (PTM): self-propelled manipulator-type loaders are characterized by intensive technological loads, high speeds of lifting and moving loads, while the required resource characteristics are not always provided. The durability of PTM is mainly determined by the durability of the supporting metal structure. The analysis of various methods for assessing the reliability of PTM metal structures, taking into account the fatigue strength of the material, is given. It is established that one of the ways of designing structures with a minimum mass is to increase the design resistances of materials, however, the margin factor is inconvenient for assessing the readiness of the structure for operation. It is necessary to create a more universal criterion – the probability of failure. The aim of the work is to develop a methodology and algorithm for quantifying the probability of safe operation of a metal structure, taking into account the reduction in load-bearing capacity. To study the fatigue strength indicators of crane beams of forest complex machines and the factors influencing it, a crane of various lifting capacities of 32/5 tons is considered. The calculation of the fatigue strength of the metal structure of the crane was made. The number of loading cycles in the 3K operating mode after the expiration of 5 years is $N = 3,0 \cdot 10^5$. With the material used, steel C255 [GOST 27772-88] with a temporary $R_{m0.2} = 380$ MPa and a calculated R_v fatigue resistance taken depending on the temporary resistance of steel $R_{m0.2}$, therefore, $R_v = 120$ MPa, fatigue strength was from 328.88 MPa to 167.98 MPa for various time intervals of 5-50 years. The calculated dependences of the safety coefficient on the operating time of the crane with a lifting capacity of 32/5 tons, depending on the operating mode of the crane from 7.9 to 2.01, are obtained. The results obtained can be used in the design of PTM metal structures also in construction and agriculture.

Keywords: *forest machines, metal structure, dynamic loads, cranes. manipulators, fatigue strength, reliability*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design of VSUFT Petr I. Popikov. Authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflicts of interest: The authors of this article have declared no personal, commercial, ideological, intellectual conflicts of interest in the preparation, writing and publication of this article.

For citation: Popikova A.V., Konyukhov A.V., Popikov S.K. (2023). Assessment of the reliability of metal structures of lifting and transport machines of the forest complex, taking into account the fatigue strength of the material // *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal]. – Vol. 13. – No. 1 (49). – pp. 194–208 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/13>.

Received 06.02.2023. *Revised* 12.03.2023. *Accepted* 21.03.2023. *Published online* 15.05.2023.

Введение

Условия работы в лесном комплексе подъемно-транспортных машин (ПТМ): козловых, консольно-козловых, мостовых, башенных, кабельных и мостокабельных кранов, а также самоходных лесопогрузчиков манипуляторного типа в настоящее время характеризуются достаточно интенсивными технологическими нагрузками, высокими скоростями подъема и перемещения грузов, при этом не всегда обеспечиваются требуемые ресурсные характеристики. Лесозаготовительные машины манипуляторного типа подвергаются значительным циклическим или ударным нагрузкам в несколько раз превосходящие силы тяжести поднимаемых и перемещаемых деревьев.

В работе [1] отмечается, что при воздействие знакопеременных нагрузок на металлоконструкции ПТМ в процессе эксплуатации происходит деградация физико-механических свойств материала. По результатам исследований построены кинетические кривые, принадлежащие одному семейству, которые пересекают усталостную кривую в характерных точках. По этим графикам можно определить циклически одинаковые зоны для материалов близкими по значениям физико-механическими свойствами.

Анализ разрушений металлических конструкций мостовых кранов показал [2], что коэффициент прочности сварного шва зависит от способа сварки и конструкцией шва. Например, для таврового шва Т1 с конструктивным не проваром коэффициент прочности снижается до уровня

$\varphi=0,65$, а при полной проварке повышается до $\varphi=0,9-1,0$. Для крана группы режима 6К, 7К при 1,5 сменной работе установленная безотказная наработка на отказ составляет 3,5 года. На основании исследований составлена диагностическая карта сварных соединений металлоконструкций концевых балок, которая позволит существенно поднять качество диагностики сварных соединений.

На основании проведенных исследований [3; 4] коррозионной и усталостной поврежденности металлоконструкции ПТМ установлена зависимость теоретического коэффициента концентрации напряжений от глубины дефекта, который принимает значения от 1,6 до 2,75. В результате коррозионного повреждения совместно с питтингообразованием в течение 12 лет эксплуатации предел выносливости для стали 09Г2С снизился с 277,87 МПа до 136,3 МПа.

Исследования [5; 6] российских и китайских ученых по применению фиброармированных полимерных материалов в металлических конструкциях для восстановления прочности при повреждениях коррозией, показали, что средняя несущая способность образцов до усиления составила 18,1 кН, а после усиления волокном – 24,1 кН, т.е. несущая способность образцов увеличилась на 33 %.

В статье [7] предлагается методика обеспечения безотказности металлоконструкций грузоподъемных кранов в течение срока службы, которая позволяет обосновать допусковое напряжение по критерию сопротивления усталости с заданной вероятностью.

Для обеспечения безотказности в течение срока в модели используются данные о прочностных характеристиках конструкционных сталей, технологии изготовления и конфигурации детали, данные о действующих нагрузках, циклической долговечности, требуемой производительности, стоимости изготовления и ремонта. Разработан алгоритм расчета допускаемого напряжения по критерию сопротивления усталости в зависимости от планируемого срока службы, технической производительности, вероятности безотказной работы.

При внедрении систем автоматизации инженерных расчетов (CAE-системы) на машиностроительных предприятиях [8] стало возможно проводить оценку поведения компьютерной 3-D модели объекта в различных условиях нагружения. Особенно актуальным является применение систем автоматизации в лесном машиностроении при оценке статической прочности шарнирных соединений элементов металлических конструкций гидроманипуляторов лесных машин.

Испытания образцов из стали [9] марки Ст3 на усталостную прочность проводили на специальном стенде с вращением образца от электродвигателя. К свободному концу образца прикладывали консольную нагрузку. Испытания образцов с диаметрами 5 мм и 13 мм, показали, что циклическая прочность для меньшего диаметра рабочей части образца (рис. 1, кривая 1) оказалась выше, т.е. для образца с диаметром 13 мм наклон кривой усталости увеличивается, а циклическая прочность уменьшается (рис. 1, кривая 2). Это объясняется тем, что зарождение усталостных трещин в образцах с меньшим диаметром полосы скольжения располагаются на большом расстоянии друг от друга, а при увеличении диаметра они расположены плотнее.

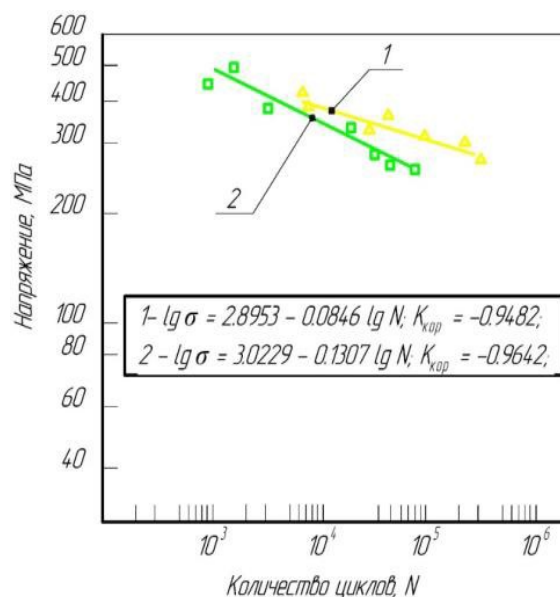


Рисунок 1. Зависимости напряжения усталости от количества циклов нагружения

1 - диаметр d=5 мм; 2 – диаметр d=13 мм – изгиб вращающегося образца

Figure 2. Dependences of fatigue stress on the number of loading cycles

1 - diameter d=5 mm; 2 – diameter d=13 mm – bending of a rotating sample

Источник: собственная композиция авторов
 Source: author's composition

В работах [10;11;12] отмечается, что показатели несущей способности материалов полностью не определены, т.к. зависят от технологии изготовления и условий эксплуатации, поэтому применение традиционных вероятностных методов при наличии неполной статистической информации приводит к неверному результату. В этом случае рекомендуется применять методы теории возможностей. При увеличении нагружения область отказа возрастает, поэтому рекомендуется для оценки нижнего значения принимать верхнюю плотность распределения, а для оценки верхнего значения необходима нижняя плотность.

Однако, на практике важно знать наибольшее значение отказа и, соответственно, наименьшую более обеспеченную надежность элемента конструкции лесной машины.

В работе [13] разработаны методы и технические средства диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкции элементов гидропривода. Установлено, что при уменьшении коэффициента податливости элементов гидропривода рукоятки лесной машины Харвестер JD1479F, от 0,7 до 0,4 см⁵/кг приводит к уменьшению логарифмического декремента затуханий от 0,260 до 0,192, что влияет на увеличение длительности колебаний давления рабочей жидкости при переходных процессах и способствует усталостным разрушениям металлоконструкции манипулятора.

В работах [14;15] приведены результаты математического моделирования нагружения комбинированного лесного манипулятора. Получены графики зависимостей высоты и ширина поперечных сечений металлоконструкции стрелы и рукоятки от грузового момента и максимальный вылет стрелы. Моделирование стрелы выполнено в программе SOLIDWORKS. Материалом металлоконструкции манипулятора принята сталь 09Г2С [ГОСТ 19282-73] с допустимым напряжением $[\sigma] = 350$ МПа. Установлено, что наибольшие напряжения возникают в местах крепления проушины к стреле, при этом максимальное напряжение составляет 278 МПа, что не превышает допустимого.

В работе [16] для предложенных структурных и кинематических схем гидроманипуляторов разработаны математические модели и компьютерные программы. Проведено моделирование кинематики и динамики элементов металлоконструкции и установлено, что колебания давления в полостях гидроцилиндров эквивалентны знакопеременным нагрузкам в узлах крепления гидроцилиндров и самих металлоконструкциях, что при большой амплитуде колебаний сильно влияет на усталостную прочность металлоконструкций.

В работах представлены результаты исследований, направленных на снижение [17;18] максимальных колебаний давления рабочей жидкости в гидроприводах грузоподъемных механизмов манипуляторов путем обоснования и оптимизации параметров компоновки гидроцилиндров и демпфирующих устройств с учетом влияния податливости упругих элементов. Установлено, что упругость элементов опорной части может привести к

преждевременному выходу машины из рабочего состояния из-за усталостного разрушения некоторых ее элементов, поэтому жесткость опорной части должна быть более 100000 Н/м.

В работах [19; 20] на основе моделирования реализована новая концепция электрогидростатического привода с автоматическим управлением на гидравлических манипуляторах большой грузоподъемности. Замкнутый регулируемый гидропривод обеспечивает удержание груза, обработку перегрузок и компенсацию дифференциального потока, при этом уменьшается амплитуда раскачивания груза и снижение динамических нагрузок на металлоконструкцию манипулятора.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании ПТМ как в лесном комплексе, так и в строительстве и сельском хозяйстве.

Целью работы является разработка методики и алгоритма количественной оценки вероятности безопасной работы металлоконструкции ПТМ лесного комплекса с учетом снижения несущей способности, ввиду усталости материала.

Материалы и методы

При проектировании металлических конструкций и их элементов, непосредственно воспринимающих многократно действующие подвижные нагрузки с достаточным количеством циклов нагружения, которые приводят к явлению усталости, следует проводить расчет на усталость.

В данной работе для исследования показателей усталостной прочности подкрановых балок и факторов, оказывающих на нее влияние, рассмотрен кран грузоподъемности 32/5 т. Для изучения влияния количества циклов нагружения на значение усталостной прочности рассматриваются варианты режима работы крана: легкий 3К, средний 6К, тяжелый 8К.

Расчет на усталость по пункту 12.1.2 [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81] производится по формуле

$$\frac{\sigma_{max}}{\alpha R_v \gamma_v} \leq 1,$$

R_v — расчетное сопротивление усталости, принимаемое в зависимости от временного сопротивления стали R_{un} ;

α – коэффициент, учитывающий число циклов нагружения N ,

при $N \geq 3,9 \cdot 10^6$, принимаем $\alpha = 0,77$;

при $N < 3,9 \cdot 10^6$, вычисляем по формуле:

$$\alpha = 0,064(N/10^6)^2 - 0,5(N/10^6) + 1,75.$$

γ_v – коэффициент, определяемый по таблице 36 [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81] в зависимости от напряженного состояния и коэффициента асимметрии напряжений.

Коэффициент асимметрии напряжений определяется по формуле:

$$\rho = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}},$$

где $\sigma_{max,min}$ – наибольшее и наименьшее по абсолютному значению напряжение в рассчитываемом сечении.

Расчет на усталость по пункту 11.3 [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81] производится по формуле:

$$\sigma_{max} \leq \alpha R_u \gamma_u \left(\frac{N_b}{N} \right)^m,$$

где $N_b = 5 \cdot 10^5$ – базовое число циклов нагружения при расчете на малоцикловую прочность;

N – малоцикловая долговечность элемента металлической конструкции;

m, m_0 – параметры, характеризующие угол наклона кривой малоциклового усталости;

$$m = m_0 c;$$

m_0 – принимается по таблице 30 [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81];

c – коэффициент, принимаемый по таблице 31 [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81].

R_u – расчетное сопротивление по пределу временного сопротивления,

γ_u – коэффициент надежности, принимаемый 1,3 (пункт 4.3) [СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81].

Разделение расчетных величин на две основные группы позволяет сформулировать задачу расчета конструкций на безопасность в виде требова-

ния о выполнении с некоторой достаточной вероятностью выполнения неравенства:

$$\tilde{R} - \tilde{Q} > 0,$$

где \tilde{R} – обобщенная прочность конструкции;

\tilde{Q} – обобщенная нагрузка.

$\tilde{R} - \tilde{Q}$ могут зависеть от ряда случайных и детерминированных величин, причем определение статистических свойств величин $\tilde{R} - \tilde{Q}$ производится самостоятельно, независимо одна от другой.

В общем случае прочность и нагрузка являются случайными функциями времени, в расчете понимаем $\tilde{R} - \tilde{Q}$, как случайные величины, обладающие определенными законами распределения.

При определении вероятности разрушения целесообразно ввести следующую величину:

$$\tilde{S} = \tilde{R} - \tilde{Q},$$

которую называют резервом прочности, при этом неравенство (1) принимает вид:

$$\tilde{S} > 0.$$

Для любых законов распределения \tilde{R} и \tilde{Q} получим:

$$\bar{\tilde{S}} = \bar{\tilde{R}} - \bar{\tilde{Q}};$$

$$\check{\tilde{S}} = \check{\tilde{R}} + \check{\tilde{Q}}$$

$$\hat{\tilde{S}} = \sqrt{\check{\tilde{R}} + \check{\tilde{Q}}},$$

где $\hat{\tilde{S}}$ – стандарт распределения резерва прочности, равный квадратному корню из дисперсии $\check{\tilde{S}}$.

Следовательно, вероятность разрушения возможно выразить в виде:

$$V = P_S(0) = P_S(\bar{\tilde{S}} - \bar{\tilde{S}}) = P_S(\bar{\tilde{S}} - \gamma \hat{\tilde{S}}),$$

где γ – характеристика безопасности.

Специалист в области механики А.Р. Ржаницын предложил считать, что характеристика безопасности γ представляет собой число стандартов S , которые укладываются в интервале от $S = 0$ до $S = \bar{\tilde{S}}$.

Таким образом, характеристику безопасности определяем по формуле

$$\gamma = \frac{\bar{\tilde{R}} - \bar{\tilde{Q}}}{\sqrt{\check{\tilde{R}} + \check{\tilde{Q}}}},$$

где $\bar{\tilde{R}}, \bar{\tilde{Q}}$ – математическое ожидание прочности и нагрузки;

$\check{\tilde{R}}, \check{\tilde{Q}}$ – дисперсия прочности и нагрузки.

Так как значение дисперсии есть квадрат среднеквадратического отклонения величин прочности и нагрузки, формулу для нахождения характеристики безопасности γ можно представить в виде:

$$\gamma = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}$$

При выполнении нормального закона распределения \tilde{S} формула для нахождения вероятности разрушения (\uparrow) имеет вид:

$$V = \frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{0 - S}{\tilde{S}}\right) = \frac{1}{2} - \Phi(\gamma),$$

где Φ – интеграл вероятности Гаусса.

Интеграл вероятности Гаусса имеет вид:

$$\Phi(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\gamma \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

В сравнении с вероятностью разрушения V характеристика безопасности γ имеет преимущество, которое заключается в том, что оно выражается небольшим числом, обычно большим единицы, во время того, как V представляет собой очень малую дробь.

Интеграл вероятности Гаусса возможно определить с учетом того, что при определении значения $\Phi(\gamma)$ для отрицательных величин аргумента γ следует использовать следующее тождество:

$$\Phi(-\gamma) = 1 - \Phi(\gamma).$$

Значения $\Phi(\gamma) > 5$ можно считать очень большими, следовательно, соответствующими крайне малой вероятности разрушения.

Выдающийся ученый А.П. Сеницын, основоположник методики расчета строительных конструкций на надежность на основе теории риска, предложил оценивать безопасную работу строительной конструкции по так называемому показателю риск согласно формуле:

$$Q_f = \lg(V).$$

Доктор технических наук А.В. Перельмутер в своих работах так же использовал подобный принцип для нахождения логарифмического показателя уровня риска. Удобство использования данной величины заключается в том, что решена проблема трудности анализа значений уровня риска ввиду достаточно маленького значения.

Расчетный момент от вертикальной нагрузки следует определять по следующей формуле:

$$M_{max} = \alpha \sum F_{ki} \cdot y_i,$$

где α – коэффициент, который учитывает влияние собственного веса подкрановых конструкций и временной нагрузки на тормозной площадке [18];

y_i – ординаты линии влияния.

Для балок пролетом 6 м принимаем $\alpha = 1,03$; для пролета 12 м $\alpha = 1,05$.

Таким образом, наибольшее напряжение определяем по формуле:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_x^H},$$

где W_x^H – момент сопротивления сечения для нижнего волокна.

Результаты исследования

При расчете металлоконструкции на усталость необходимы данные о количестве циклов нагружения кранов за расчетный период. Количество циклов нагружения для крана грузоподъемностью 32/5 т при режиме работы 3К по истечению срока 5 лет составляет $N = 3,0 \cdot 10^5$.

Так как $N = 3,0 \cdot 10^5 < 3,9 \cdot 10^6 \alpha = 0,1,6$.

Используемый материал сталь С255 с временным сопротивлением $R_{un} = 380$ МПа (таблица В.3[14]), следовательно, $R_v = 120$ МПа.

Так как конструкция линейно-деформируема, а так же схема нагружения не изменяется, то напряжения прямо пропорциональны интенсивности нагрузки, следовательно, при нахождении коэффициента асимметрии можно перейти от соотношения напряжений к аналогичному соотношению нагрузок.

К минимально возможной интенсивности нагрузки относится постоянная нагрузка, которая включает в себя собственный вес подкрановой балки, а так же тормозной балки и кранового рельса. Принимая, что балка разрезная, предполагаем отсутствие действия временной нагрузки (кран переместился на другой участок). В данном случае под временной нагрузкой понимается крановая нагрузка.

К максимально возможной интенсивности нагрузки относится постоянная нагрузка, к которой

добавляется временная крановая нагрузка, а это вес мостового крана, вес тележки и вес груза (грузоподъемность крана).

Проведены расчеты усталостной прочности для различных режимов нагружения крана 32/5 с

использованием программы Microsoft Excel. Результаты расчетов для крана 32/5 т режима работы 3К представлены в табл. 1, а для других режимов 6К и 8К в виде графиков (рис. 3 и 4).

Таблица 1

Усталостная прочность для крана 32/5 т режима работы 3К

Table 1

Fatigue strength for crane 32/5 t operating mode 3K

Продолжительность, лет Period, years	Количество циклов, N Quantity cycles, N	Усталостная прочность σ_R , МПа Fatigue strength σ_R МПа	
		СП 16.13330.2017	СП 294.1325800.2017
5	$3,0 \cdot 10^5$	328,88	833,65
10	$6,1 \cdot 10^5$	301,12	683,17
15	$9,2 \cdot 10^5$	275,84	586,50
20	$1,2 \cdot 10^6$	253,02	513,79
25	$1,5 \cdot 10^6$	232,68	455,90
30	$1,8 \cdot 10^6$	214,80	408,77
35	$2,1 \cdot 10^6$	199,39	370,21
40	$2,4 \cdot 10^6$	186,45	338,86
45	$2,7 \cdot 10^6$	175,98	313,86
50	$3,1 \cdot 10^6$	167,98	294,59

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

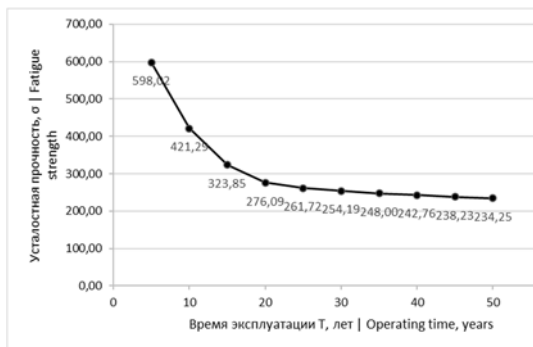


Рисунок 2. Кривая усталости для крана 32/5 т при режиме работы 6К

Figure 2. Fatigue curve for crane 32/5 t at 6K operating mode

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition



Рисунок 3. Кривая усталости для крана 32/5 т при режиме работы 8К

Figure 3. Fatigue curve for crane 32/5 t at 8K operating mode

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Анализ кривых усталости, полученных согласно СП 294.1325800.2017 для различных

режимов показал, что при режиме 3К кривая усталости плавно снижается на протяжении всего

времени эксплуатации от 833,65 МПа до 294,59 МПа. При среднем режиме 6К кривая усталости резко снижается за срок эксплуатации 20 лет от 598,02 МПа до 323,85 МПа, а затем плавно в течение 30 лет до значения 234,25 МПа. При тяжелом режиме эксплуатации 8К кривая усталости резко снижается за 10 лет эксплуатации от 434,54 МПа до 282,27 МПа, а за оставшиеся 40 лет плавно снижается до значения 211,38 МПа.

На основе данных об усталостной прочности, полученных в результате расчета

согласно СП16.13330.2017, можем прогнозировать снижение несущей способности под-крановой балки, используя при этом известные кривые усталости (графики на рис. 2 и 3).

Далее в табличной форме (табл. 2) представлены результаты расчета показателя риска для крана 32/5 т при режиме 3К согласно СП 294.1325800.2017, а для других режимов 6К и 8К в виде графиков (рисунки).

Таблица 2

Определение показателя риска для крана 32/5 т и 3К

Table 2

Determination of the risk indicator for the crane 32/5 t and 3K

Срок службы, лет Service life, years	R_r , кН/см ²	\bar{R} , кН/см ²	σ_R , кН/см ²	γ	$\varphi(\gamma)$	V	Q_f
5	83,37	99,78	9,98	7,90	4,99997	$3,0 \cdot 10^6$	5,52
10	68,32	81,77	8,18	7,37	4,99997	$3,0 \cdot 10^6$	5,52
15	58,65	70,20	7,02	6,90	4,99997	$3,0 \cdot 10^6$	5,52
20	51,38	61,49	6,15	6,42	4,99997	$3,0 \cdot 10^6$	5,52
25	45,59	54,57	5,46	5,94	4,99997	$3,0 \cdot 10^6$	5,52
30	40,88	48,93	4,89	5,46	4,99997	$3,0 \cdot 10^6$	5,52
35	37,02	44,31	4,43	5,00	4,99997	$3,0 \cdot 10^6$	5,52
40	33,89	40,56	4,06	4,56	4,99997	$3,0 \cdot 10^6$	5,52
45	31,39	37,57	3,76	4,17	0,499977	$2,3 \cdot 10^6$	4,63
50	29,46	35,26	3,53	3,83	0,499936	$6,4 \cdot 10^5$	4,19

Примечание: R_r – усталостная прочность материала; \bar{R} – среднееарифметическое значение распределения прочности стали; σ_R – среднеквадратическое значение распределения прочности стали; γ – характеристика безопасности; $\varphi(\gamma)$ – интеграла вероятности Гаусса; V – вероятности разрушения; Q_f – логарифмический показатель риска

Note: R_r – the fatigue strength of the material; \bar{R} – the arithmetic mean value of the steel strength distribution; σ_R – the RMS value of the steel strength distribution; γ – the safety characteristic; $\varphi(\gamma)$ – the Gaussian probability integral; V – the probability of failure; Q_f – the logarithmic risk indicator

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

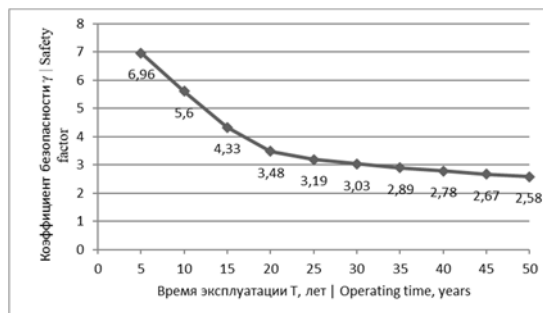


Рисунок 4. Зависимость коэффициента безопасности γ от времен эксплуатации крана 32/5 т при режиме работы 6К

Figure 4. The dependence of the safety coefficient γ on the operating time of the crane 32/5 t at 6K operation mode

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Таким образом, анализ зависимостей коэффициента безопасности γ от времен эксплуатации крана для различных режимов показал, что при режиме 3К зависимость плавно снижается на протяжении всего времени эксплуатации от 7,90 до 3,83. При среднем режиме 6К зависимость резко снижается за срок эксплуатации 20 лет от 6,96 до 2,58. При тяжелом режиме эксплуатации 8К зависимость коэффициента безопасности резко снижается за 10 лет эксплуатации от 5,73 до 2,01.

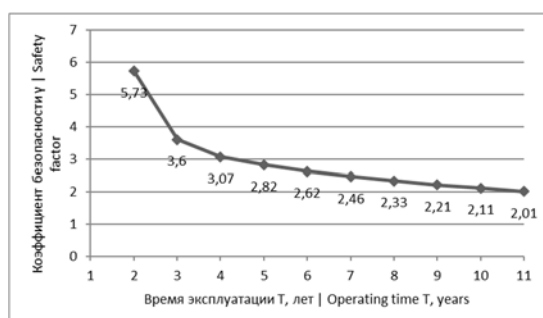


Рисунок 5. Зависимость коэффициента безопасности γ от времен эксплуатации крана 32/5 т при режиме работы 8К

Figure 5. The dependence of the safety coefficient γ on the operating time of the crane 32/5 t in the operating mode of 8K

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Проведены исследования повышения надежности металлоконструкций манипуляторов лесотранспортных машин путем применения новых пневмогидравлических демпфирующих устройств. Установлено, что при подключении пневмогидравлического аккумулятора максимальные всплески давления рабочей жидкости, которые передаются на металлоконструкцию стрелы, уменьшаются в 1,5-1,7 раза [22].

В результате статистического анализа среднемаксимальных всплесков давления рабочей жидкости были получены следующие статистические характеристики (табл. 3).

Таблица 3

Статистические данные анализа давления системы без аккумулятора и с аккумулятором

Table 3

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
Экцесс Excess	0,09976	-0,3240
Асимметричность Asymmetry	0,96401	0,5128

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Полученные статистические значения асимметричности нагрузки (табл. 3) необходимо учитывать при расчетах на надежность по предлагаемой методике.

Выводы

1. К настоящему моменту времени в практике расчета металлоконструкций на надежность в большей степени преобладают теоретические методы.

2. На основании выполненных теоретических исследований была достигнута основная цель работы, а именно создание методики расчета надежности металлоконструкции ПТМ лесного комплекса с учетом усталостной прочности материала, базирующейся на определении числовых показателей надежности исследуемой конструкции.

3. На основе результатов расчета согласно СП 294.1325800.2017 можно сделать вывод о том, что надежность подкрановых балок для кранов

различной грузоподъемности 32/5 т обеспечена с учетом влияния усталости материала. Причем ограниченно-работоспособное состояние для более легкого крана наступает через достаточный срок эксплуатации.

4. Анализ результатов расчета по СП16.13330.2017 свидетельствует о том, что при расчете усталостной прочности следует обращать особое внимание на асимметричность нагрузки, так как это понижает значение усталостной прочности и как следствие со временем эксплуатации надежность, в особенности при больших значениях количества циклов нагружения.

5. Одним из эффективных методов повышения надежности металлоконструкций манипуляторов мобильных лесотранспортных машин является подключение в гидроприводы новых пневмогидравлических демпфирующих устройств.

Список литературы

1. Лукашук О.А. Усталостный расчет металлоконструкций грузоподъемных машин /Лукашук О.А., Швецов В.В. // Сб. по материалам конференции «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники» (26–27 мая 2022 года, г. Брянск), с.90-95. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49399814&pff=1>
2. Короткий А.А. Вопросы безопасности соединений конструкций грузоподъемных кранов / А. А. Короткий, А. Н. Павленко, Э. А. Панфилова, Д. Н. Симонов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 1. — С. 41–47. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48060515>
3. Селиверстов В.Г. Взаимосвязь усталостных и коррозионных процессов при оценке ресурса несущих металлоконструкций грузоподъемных машин / Г. В. Селиверстов, К. С. Коломиец В. Ю. Анцев, Н. В. Анцева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021 – Вып. 3. – С. 132-137. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45684528>
4. Селиверстов Г.В., Моисеев В.И. Оценка накопленной поврежденности по критерию роста трещины // Строительные и дорожные машины. 2020. 7. С. 31-35. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44044596>
5. Солодов Н.В., Водяхин Н.В., Ищук Я.Л. Повышение несущей способности нахлесточного соединения тонколистовых деталей // Вестник БГТУ им.В.Г.Шухова, 2019 №9. С.30-35. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41213602>
6. Elkhabeery O.H., Safar S.S., Mourad S.A. Flexural strength of steel I-beams reinforced with CFRP sheets at tension flange // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 148. Pp. 572–588. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.05.038>
7. Котесов, А. А. Методика обеспечения безотказности металлоконструкций грузоподъемных кранов в течение срока службы / А. А. Котесов, В. Е. Касьянов, А. А. Котесова // Вестник РГУПС. – 2020. – № 4. – С. 30–39. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44503577>
8. Зверев И.А. Методика оценки статической прочности шарнирных соединений лесных машин с использованием программного обеспечения «ANSYS» / Зверев И.А., Трофимов А.В. // Повышение

эффективности лесного комплекса : материалы Восьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, ФГБОУ Петрозав. гос. ун-т. — Петрозаводск : Издательство ПетрГУ, 2022, с.171-174 Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44119394>

9. Мыльников в.в.1, Пронин а.и.2, Кондрашкин о.б.1, Шетулов д.и., Исследование строительной стали при испытаниях на усталость по схеме консольного изгиба с вращением/ «Механическое оборудование металлургических заводов». №2(17) 2021 с.3-8 Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47961181>

10. Гучинский Р.В. Неопределенности в оценке усталости конструкций при проектировании и эксплуатации / Р. В. Гучинский, С. В. Петинов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения – 2021.– № 4 (52). – С. 35-44. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47395900>.

11. Скобцов И.Г. Оценка вероятности отказа элементов конструкций лесных машин при неполной информации о нагруженности / И. Г. Скобцов, М. С. Королев, А. Д. Шабалин // Повышение эффективности лесного комплекса : материалы восьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2021, с.174-177. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47156156>

12. Pitukhin, A. V. Optimal Design Based on Probability Approach And Fracture Mechanics / A. V. Pitukhin, I. G. Skobtsov [Electronic resource] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - № 560. DOI:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/560/1/012085>

13. Тарбеев А. А. Обеспечение надежности гидроприводов лесных машин совершенствованием методов и средств их диагностирования Специальность 05.21.01 – технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Йошкар-Ола, 2019. Режим доступа: https://www.volgatech.net/upload/documents/defence-of-theses/diss_TarbeevAA.pdf.

14. Черник Д. В., Черник К. Н. 2020 // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 919 052037 DOI: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/919/5/052037>.

15. Chernik D. V. Dynamic measurements of side loads on technological equipment of tracked forest loader 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) Режимдоступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43234115>

16. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Моделирование рабочих процессов в дроссельнорегулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при раздельном движении звеньев // Научнотехнический вестник Брянского государственного университета. 2018. №4. С. 355- 379. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379>

17. Ловейкин, В. С. Синтез оптимального динамического режима движения стрелы манипулятора, установленного на упругом основании / В. С. Ловейкин, Д. А. Мишук // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 1. С. 55–61. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37083940>.

18. Попиков П.И., Четверикова И.В., Воскобойник М.Ю., Моделирование рабочих процессов гидропривода механизма подъема манипулятора автосортиментовоза// актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6. №7 (43). С. 76-80 Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36745449>

19. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators // Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 20. – P. 6566. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206566>.

20. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load // Mechatronics. – 2021. – Т. 77. – P. 102599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102599>.

21. Agostini T. et al. Effect of energy recovery on efficiency in electro-hydrostatic closed system for differential actuator // Actuators. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – P. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/act9010012>.

22. Glushkov S. Rybak A., Popikov P., Uskov V., Bogdanov D., Konyukhov A. Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator // Forestry Engineering Journal. 2021. T. 11. № 4 (44). P. 88-99. DOI:<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8>

References

1. Lukashuk O.A. Fatigue calculation of metal structures of lifting machines /Lukashuk O.A., Shvetsov V.V.// Collection based on the materials of the conference "Innovative development of lifting and transport technology" (May 26-27, 2022, Bryansk), pp.90-95/ URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49399814&pf=1>
2. Korotkiy A.A. Questions of safety of joints of structures of lifting cranes / A. A. Korotkiy, A. N. Pavlenko, E. A. Panfilova, D. N. Simonov // Safety of technogenic and natural systems. — 2022. — No. 1. — pp. 41-47. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48060515>
3. Seliverstov V.G. Interrelation of fatigue and corrosion processes in assessing the resource of load-bearing metal structures of lifting machines / G. V. Seliverstov, K. S. Kolomiets V. Yu. Antsev, N. V. Antseva // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. — 2021 — Issue 3 — pp. 132-137. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45684528>
4. Seliverstov G.V., Moiseev V.I. Assessment of accumulated damage by the criterion of crack growth // Construction and road machines. 2020. 7. pp. 31-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44044596>
5. Solodov N.V., Vodyakhin N.V., Ishchuk Ya.L. Increasing the load-bearing capacity of the overlapping connection of thin-sheet parts // Bulletin of BSTUim.V.G.Shukhov, 2019 No.9.Pp.30-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41213602>
6. S.H Xia и JG Teng [9]. 9. Elkhabeery O.H., Safar S.S., Mourad S.A. Flexural strength of steel I-beams reinforced with CFRP sheets attension flange // Journal of Constructional Steel Research. 2018. Vol. 148. Pp. 572–588. DOI: <https://doi:10.1016/j.jcsr.2018.05.038>
7. Kotesov, A. A. Methodology for ensuring the reliability of metal structures of lifting cranes during the service life / A. A. Kotesov, V. E. Kasyanov, A. A. Kotesova // Bulletin of RSUPS. — 2020. — No. 4. — pp. 30-39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44503577>
8. Zverev I.A. Methodology for assessing the static strength of articulated joints of forest machines using the ANSYS software / Zverev I.A., Trofimov A.V. // Improving the efficiency of the forest complex : materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation / M-in Science and Higher Education. education grew. Federation, Petrozavodsk State University. — Petrozavodsk : PetrSU Publishing House, 2022, pp.171-174 URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44119394>
9. Mylnikov V.v.1, Pronin A.I.2, Kondrashkin O.B.1, Shetulov D.I., Investigation of construction steel during fatigue tests according to the scheme of cantilever bending with rotation/ "Mechanical equipment of metallurgical plants". No.2(17) 2021 pp.3-8 URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47961181>
10. Guchinsky R.V. Uncertainties in the assessment of structural fatigue during design and operation/ R. V. Guchinsky, , S. V. Petinov //Bulletin of the Ural State University of Railways • No. 4 (52) • 2021 from 35-44 URL: <https://ISSN 2079-0392>
11. Skobtsov I.G. Estimation of the probability of failure of structural elements of forest machines with incomplete information about loading / I. G. Skobtsov, M. S. Korolev, A.D. Shabalin// Improving the efficiency of the forest complex : materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation / Ministry of Science and Higher Education. education grew. Federation, Petrozavodsk State University. — Pet-rozavodsk : PetrSU Publishing House, 2021, pp.174-177. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47156156>
12. Pitukhin, A. V. Optimal Design Based on Probability Approach And Fracture Mechanics / A. V. Pitukhin, I. G. Skobtsov [Electronic resource] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2019. - № 560. DOI: <https://doi:10.1088/1757-899X/560/1/012085>

13. Tarbeev A. A. Ensuring the reliability of hydraulic drives of forest machines by improving methods and means of their diagnosis Specialty 05.21.01 – technology and machines of logging and forestry. Abstract dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, Yoshkar-Ola, 2019
14. D. V. Chernik and K. N. Chernik 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 919 052037 DOI: <http://doi:10.1088/1757-899X/919/5/052037>
15. Chernik D. V. Dynamic measurements of side loads on technological equipment of tracked forest loader 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43234115>
16. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Modeling of work processes in a throttle-controlled hydraulic drive of manipulative systems of mobile machines with separate movement of links // Scientific and Technical Bulletin of the Bryansk State University. 2018. No. 4. pp. 355-379. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379>
17. Loveykin, V. S. Synthesis of the optimal dynamic mode of movement of the manipulator boom mounted on an elastic base / V.S. Loveykin, D.A. Mishchuk // Science and Technology. 2019. Vol. 18, No. 1, pp. 55-61. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37083940>
18. Popikov P.I., Chetverikova I.V., Voskoboynik M. U., Modeling of working processes of hydraulic drive of lifting mechanism of a manipulator of an auto-sorting truck// current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2018. Vol. 6. No.7 (43). pp. 76-80 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36745449>
19. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Novel Concept for Electro-Hydrostatic Actuators for Motion Control of Hydraulic Manipulators // Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 20. – P. 6566. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14206566>
20. Jensen K. J., Ebbesen M. K., Hansen M. R. Anti-swing control of a hydraulic loader crane with a hanging load //Mechatronics. – 2021. – Т. 77. – P. 102599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2021.102599>
21. Agostini T. et al. Effect of energy recovery on efficiency in electro-hydrostatic closed system for differential actuator //Actuators. – Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. – Т. 9. – №. 1. – P. 12. DOI: <https://doi:10.3390/act9010012>
22. Glushkov S. Rybak A., Popikov P., Uskov V., Bogdanov D., Konyukhov A. Modeling of the working energy-saving processes of the hydraulic drive of the lifting mechanism of a forestry manipulator // Forestry Engineering Journal. 2021. Т. 11. № 4 (44). P. 88-99. DOI: <https://doi:10.34220/issn.2222-7962/2021.4/8>

Сведения об авторах

✉ *Попикова Алина Викторовна* – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail: poalinka@mail.ru.

Конюхов Андрей Валерьевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова», кафедра механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1828-3673>, e-mail: akoniukhov@gmail.com.

Попиков Сергей Константинович – руководитель группы, ООО «ИКПАД» – Институт комплексного проектирования автомобильных дорог, ул. Депутатская, 11, г. Воронеж, Российская Федерация, 394055, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, e-mail: sergpopikov@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Alina V. Popikova* – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str.,8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9387-4254>, e-mail, e-mail: poalinka@mail.ru.

Andrey V. Konyukhov – postgraduate student, FSBEI HE “Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov”, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Timiryazev str.,8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1828-3673>, e-mail: akoniukhov@gmail.com.

Sergei K. Popikov – team leader, Institute of Integrated Highway Design, LLC, Deputatskaya str., 11, Voronezh, Russian Federation, 394055, ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-1176-9804>, e-mail: sergpopikov@mail.ru.

✉ – Для контактов/Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/14>

УДК 630*841.25



Исследование межфазного взаимодействия древесины березы с пропиточным составом

Константин В. Жужукин¹, kinkon18@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

Лариса И. Бельчинская¹, belbom@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3921-8018>

Елена В. Томина^{1,2}, tomina-e-v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

Александр Н. Зяблов², alex-nz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9134-464X>

Ву Хоанг Йен³, yenvh@hufi.edu.vn, <https://orcid.org/0000-0001-7870-0232>

Алексей С. Чуйков⁴, offlex88@belstu.by, <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

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

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Российская Федерация

³Пищевой Промышленный Университет Хошимина, Хошимин, Вьетнам

⁴УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

Целью работы явилось исследование процесса межфазного взаимодействия древесины берёзы повислой (*Betula pendula* ROTN) с матрицей разработанного пропиточного состава – отработанным моторным маслом – в трех взаимно перпендикулярных направлениях (торцовое, радиальное, тангенциальное). Определение краевого угла смачивания древесины пропиточными составами проводили на собранном нами гониометре, состоящем из камеры в USB микроскопе. Межфазное взаимодействие воды с древесиной устанавливали методом лежащей капли по значению краевого угла смачивания с использованием программы NView 10. Определена кинетика снижения величины краевого угла смачивания древесины водой в течение 90 секунд в торцовом, радиальном и тангенциальном направлениях, и водо- и биостойкости древесины. При замене водного адгезива на пропиточный состав межфазное взаимодействие усилилось, краевой угол смачивания снизился относительно дистиллированной воды от 5 до 30 раз в трех взаимно перпендикулярных направлениях и качество пропитки древесины улучшалось. Анализ динамического и статического краевых углов смачивания пропитанной отработанным моторным маслом (ОММ) древесины позволил установить значительное усиление межфазного взаимодействия функциональных групп древесины с появляющимися в отработанном моторном масле новыми, химически более активными функциональными группами, что способствует образованию гидрофобной поверхности древесины. Таким образом, величина краевого угла смачивания предоставляет информацию о качестве пропитки древесины и может использоваться как индикатор гидрофобизации древесины при обеспечении защиты от влаги и гниения.

Ключевые слова: отработанное моторное масло, древесина березы, *Betula pendula* ROTN, межфазное взаимодействие, краевой угол смачивания, вязкость

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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


Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исследование межфазного взаимодействия древесины березы с пропиточным составом / К. В. Жужукин, Л. И. Бельчинская, Е. В. Томина, А. Н. Зяблов, В. Х. Йен, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 209–221. – Библиогр.: с. 218–220 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/14>.


Поступила 18.03.2023. *Пересмотрена* 14.04.2023. *Принята* 17.04.2023. *Опубликована онлайн* 15.05.2023.


Article

Investigation of interphase interaction of birch wood with impregnating composition

Konstantin V. Zhuzhukin✉¹, kinkon18@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

Larisa I. Belchinskaya¹, belbom@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3921-8018>

Elena V. Tomina^{1,2}, tomina-e-v@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

Alexander N. Zyablov², alex-nz@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9134-464X>

Wu Hoang Yen³, yenvh@hufi.edu.vn  <https://orcid.org/0000-0001-7870-0232>

Alexey S. Chuikov⁴, offlex88@belstu.by  <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

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

²*Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation*

³*Food Industrial University Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam*

⁴*Belarussian State Technological University, 13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus*

Abstract

The purpose of this work was to study the properties of interfacial interaction of the basis of a new promising impregnating composition of used motor oil with birch wood in three mutually perpendicular directions (end, radial, tangential). Samples of birch wood were chosen as objects of study. The interfacial interaction was determined by the sessile drop method by the value of the contact angle, which makes it possible to establish a significant decrease in their values relative to distilled water when using an impregnating composition based on used motor oil, apparently as a result of the interfacial interaction between the wood and the hydrophobic matrix of the impregnating composition. When water molecules wet the hydrophilic surface of wood, which occurs as a result of adsorption and capillary condensation, water dipoles are attracted to the negatively charged surface of the molecular chains of cellulose, hemicelluloses and lignin due to the presence of unsaturated hydroxyl valences on their surface. An analysis of the dynamic and static contact angles of wetting wood impregnated with used engine oil made it possible to establish a significant increase in these angles compared to the data obtained for unimpregnated wood. The contact angles increase, apparently, as a result of the interfacial interaction of the functional groups of wood and the main components of the impregnating composition, leading to the formation of a hydrophobic surface. When comparing the contact angle of wetting wood with water and used engine oil, a decrease in its value was found when wetting used engine oil in comparison with water due to more intensive diffusion of used engine oil molecules into wood and the formation of intermolecular interactions of functional groups of wood and used engine oil.

Keywords: *used motor oil, birch wood, Betula pendula ROTH, interfacial interaction, contact angle, viscosity*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Zhuzhukin K.V., Belchinskaya L.I., Tomina E.V., Zyablov A.V., Wu Hoang Yen, Chuikov A.S. (2023) Investigation of interphase interaction of birch wood with impregnating composition. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 209-221 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/14>.

Received 18.03.2023. *Revised* 14.04.2023. *Accepted* 17.04.2023. *Published online* 15.05.2023.

Введение

В России и за рубежом проводится поиск новых, эффективных и экологичных модифицирующих материалов, способных защитить древесину от внешних воздействий и придать изделиям из древесины комплекс необходимых свойств [1]. Одним из направлений расширения диапазона промышленного использования древесины является пропитка древесины стабилизирующими составами для придания ей формоустойчивости, снижения влаго- и водопоглощения, растрескивания, повышения биостойких показателей.

Гигроскопичность древесины обусловлена адсорбционной способностью молекул воды, которая складывается из сорбционных свойств высокомолекулярных компонентов древесины, вносящих определённый вклад в общее количество сорбируемой воды (по возрастанию): лигнин, гемицеллюлоза, целлюлоза. На сорбцию молекул воды влияют,

кроме химического состава, её надмолекулярная структура, ультраструктура клеточных стенок и анатомическое строение древесины. В макромолекулах высокомолекулярных компонентов находится большое количество гидроксильных групп и практически все гидроксильные группы доступны молекулам воды. Определённый вклад в гидрофильность древесины вносят карбоксильные группы. Гидрофобизация – это процесс придания материалу водоотталкивающих свойств. В случае с древесиной это обычно делается путем пропитки древесины гидрофобным средством. Это средство проникает в древесные волокна и создает барьер, который отталкивает воду, предотвращая ее впитывание в древесину. Существует несколько способов гидрофобизации древесины и придания ей водоотталкивающих свойств. Основные способы гидрофобизации древесины представлены на рис. 1.

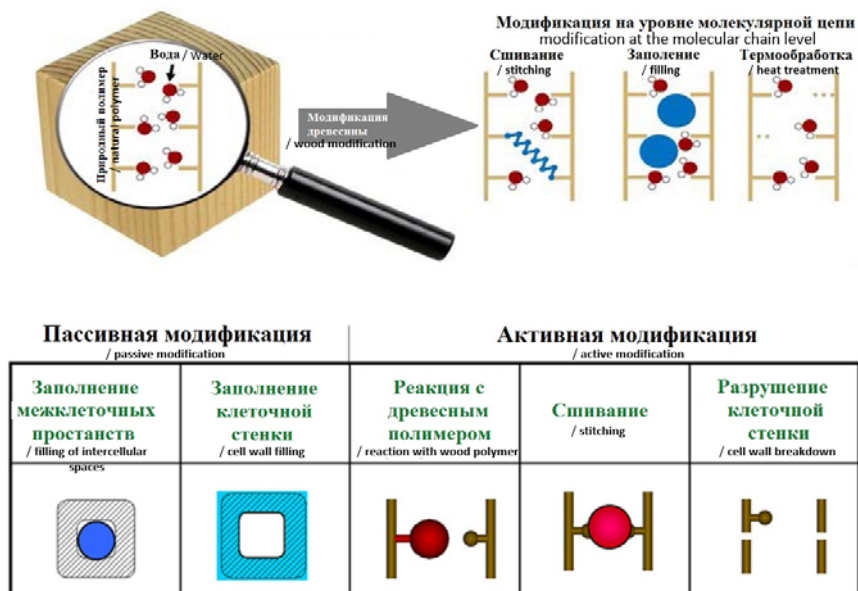


Рисунок 1. Основные способы защиты древесины от воды и влаги
Figure 1. The main ways to protect wood from water and moisture

Источник: собственные данные авторов
Source: authors' own data

Поверхностная гидрофобизация включает нанесение слоя водоотталкивающего вещества на поверхность древесины. Модификаторы могут быть изготовлены из различных материалов, таких как воск, силикон, полиуретан или эпоксидная смола. Покрытие образует на поверхности древесины защитный слой, препятствующий проникновению воды в древесину [2]. Однако этот метод менее эффективен в защите древесины от повреждения водой по сравнению с другими методами, при использовании которых древесину пропитывают водоотталкивающими средствами [3], например, химическая модификация, которая включает пропитку древесины химическими веществами, вступающими в реакцию с древесными волокнами и создающими водоотталкивающий барьер. Одним из распространенных примеров является использование алкилалкоксисиланов или димеров алкилкетенов для пропитки древесины. Химические вещества проникают в древесные волокна и вступают в реакцию с гидроксильными группами древесины, создавая водоотталкивающую поверхность [4]. Одним из распространенных химических веществ, используемых для гидрофобизации древесины, является силан. Силаны представляют собой кремнийорганические соединения, которые могут реагировать с гидроксильными группами, присутствующими в древесине, с образованием ковалентной связи. Эта связка образует защитный слой на поверхности древесины, что делает ее менее гидрофильной и более водостойкой [5]. Эффективность химической обработки для гидрофобизации древесины может зависеть от таких факторов, как тип древесины, тип используемого химиката и метод нанесения. Тем не менее, исследования показали, что химическая обработка может обеспечить надежную и длительную защиту от повреждения водой, а также улучшить размерную стабильность и долговечность древесины. Термическая обработка включает воздействие на древесину высоких температур для изменения ее физических и химических свойств. Это может включать термогидрофобную обработку, которая включает нагревание древесины в присутствии водяного пара, чтобы сделать ее гидрофобной [6, 7].

При пропитке древесины происходят межфазные взаимодействия между древесиной и пропиточной жидкостью. Эти взаимодействия могут оказать существенное влияние на успех процесса пропитки и конечные свойства древесины. На межфазное взаимодействие между древесиной и пропиточной жидкостью влияет ряд факторов, в том числе химический состав древесины, пористость древесины, химический состав пропиточной жидкости и поверхностное натяжение жидкости [8]. Когда пропиточная жидкость вступает в контакт с древесиной, она может проникнуть в древесину через естественные поры или трещины в структуре древесины. Затем пропиточная жидкость может взаимодействовать с древесиной на молекулярном уровне, что приводит к образованию химических связей или физических взаимодействий между древесиной и жидкостью. Одним из видов межфазного взаимодействия, возникающего при пропитке древесины, является адсорбция [9-12]. Адсорбция происходит, когда молекулы пропиточной жидкости прилипают к поверхности древесины, образуя тонкий слой молекул. Процесс адсорбции может происходить по нескольким механизмам, включая физическую адсорбцию, химическую адсорбцию и электростатическую адсорбцию. Физическая адсорбция связана со слабыми ван-дер-ваальсовыми силами между пропиточной жидкостью и поверхностью древесины. Химическая адсорбция, с другой стороны, включает образование химических связей между пропитывающей жидкостью и поверхностью древесины. Электростатическая адсорбция возникает при притяжении между заряженными молекулами пропиточной жидкости и заряженной поверхностью древесины [13-15].

Процесс адсорбции при пропитке древесины играет важную роль в определении проникновения и распределения пропиточной жидкости в древесине. Если пропиточная жидкость плохо адсорбируется на поверхности древесины, она может не проникнуть глубоко в древесину, и обработка пропиткой может оказаться неэффективной. И наоборот, если пропиточная жидкость сильно адсорбируется на поверхности древесины, она может не проникнуть глубоко в древесину, и обработка пропит-

кой может быть ограничена поверхностным слоем древесины.

Тип взаимодействия, возникающего при межфазном взаимодействии пропиточного состава с древесиной, зависит от химического состава пропиточного состава и поверхности древесины. Например, если пропиточная композиция представляет собой раствор на водной основе, водородные связи могут быть доминирующим взаимодействием между молекулами пропиточной композиции и поверхностью древесины. Если пропиточная композиция содержит ион металла, может возникнуть координационная связь между ионом металла и функциональными группами на поверхности древесины.

В целом при межфазном взаимодействии пропиточной композиции с древесиной могут происходить как физические, так и химические взаимодействия. Тип происходящего взаимодействия зависит от химического состава как пропиточной композиции, так и поверхности древесины, и понимание этих взаимодействий может помочь оптимизировать процесс пропитки и улучшить свойства получаемого изделия из древесины [16, 17].

Краевой угол смачивания является мерой смачиваемости поверхности и является важным параметром, который следует учитывать при пропитке древесины. При попадании капли пропиточной жидкости на поверхность древесины краевой угол представляет собой значение, образующееся между каплей и поверхностью древесины на границе трех фаз, где встречаются капля, воздух и поверхность древесины. Величина краевого угла при пропитке древесины зависит от природы пропиточной жидкости и свойств поверхности древесины. Как правило, меньший контактный угол указывает на лучшую смачиваемость и предполагает, что пропиточная жидкость глубже проникнет в древесину [18-20].

Цель данной работы – определение величины краевого угла смачивания древесины водным адгезивом и пропиточным составом, в виде отработанного моторного масла, для установления возможности межфазного взаимодействия с древесиной березы в трех взаимно перпендикулярных

направлениях (торцовое, радиальное, тангенциальное).

Материалы и методы

Для проведения экспериментов использовались образцы из древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth), срубленной в учебно-опытном лесхозе Воронежского государственного лесотехнического университета (Воронежская область, Россия). Образцы для исследований были выпилены по всему сечению ствола на высоте от 1,3 метра, влажность образцов составляла от 8-14%. Схема отбора образцов представлена на рис. 2.

Отработанное моторное масло Lukoil 10w-40, используемое в исследовании, было слито из бензинового двигателя автомобиля Lada Granta после 10 000 километров пробега. Основные свойства используемого масла были определены и представлены в исследовании [21].

Масло сливали в одноразовую полиэтилен-терефталатовую (ПЭТ) бутылку.

Для определения краевого угла смачивания древесины пропиточными составами использовали собранный в лаборатории гониометр, состоящий из камеры в USB микроскопе, жестко закрепленном в штативе, с возможностью регулировки по высоте относительно столика для образцов. Кроме того, в устройство включено подсвечивающий диод. Общий вид установки для определения угла контакта представлен на рисунке 3.

Краевой угол смачивания древесины дистиллированной водой измеряли методом лежащей капли с использованием программы NView 10. Пропиточные жидкости наносили на образцы древесины размером 20×20×20 мм (длина, ширина, высота). Перед нанесением пропиточных жидкостей образцы подсушивали в сушильном шкафу при температуре 80 °С в течение 4 часов. Образцы из сушильного шкафа доставали последовательно с целью максимального контроля влажности испытываемых образцов. Пропиточные жидкости при нанесении имели температуру окружающей среды. Условная вязкость была определена на вискозиметре Пинкевича ВПЖ.

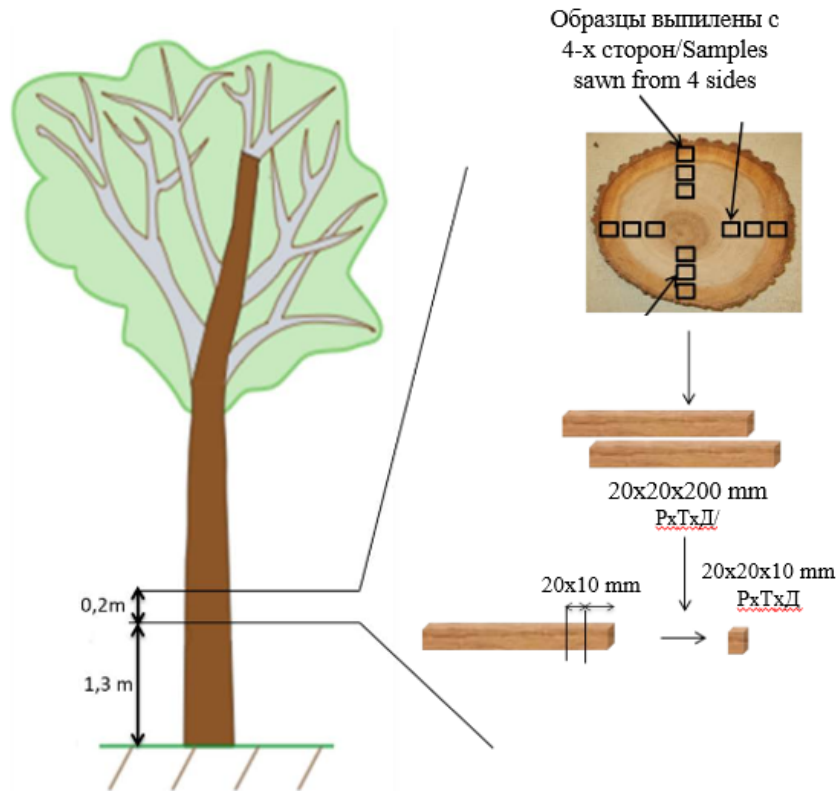


Рисунок 2. Схема выпиливания образцов из древесины для проведения испытаний

Figure 2. Diagram of sawing samples from wood for testing

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

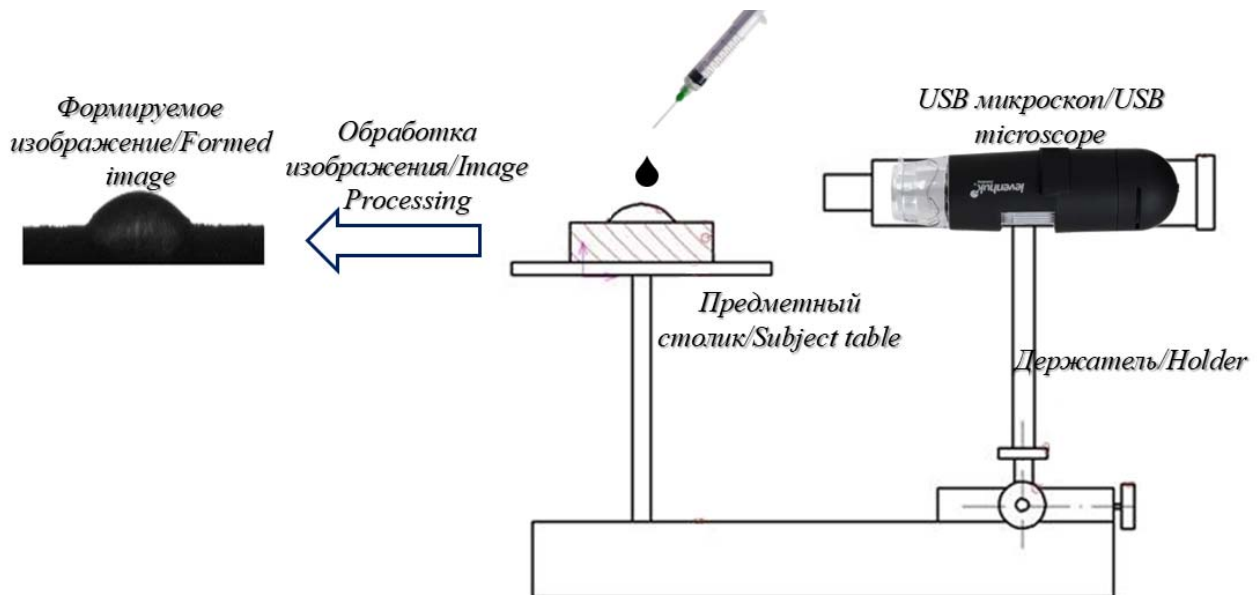


Рисунок 3. Общий вид установки для определения краевого угла смачивания методом лежащей капли

Figure 3. General view of the installation for determining the edge angle of wetting by the lying drop method

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Результаты и обсуждение

Краевой угол смачивания играет важную роль в межфазном взаимодействии при пропитке древесины. Низкий контактный угол может улучшить пропитку и глубину проникновения пропиточной жидкости, что приводит к улучшенной защите от влаги и гниения. И наоборот, большой контактный угол может уменьшить пропитку и глубину проникновения, что приведет к снижению

защиты. В связи с этим исследовались краевые углы смачивания между древесиной и отработанным моторным маслом в трех направлениях: торцовое, тангенциальное и радиальное). Полученные данные сравнивались с углом смачивания древесины дистиллированной водой также в трех направлениях.

На рис. 4 представлены результаты определения динамического краевого угла смачивания дистиллированной водой древесины березы в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

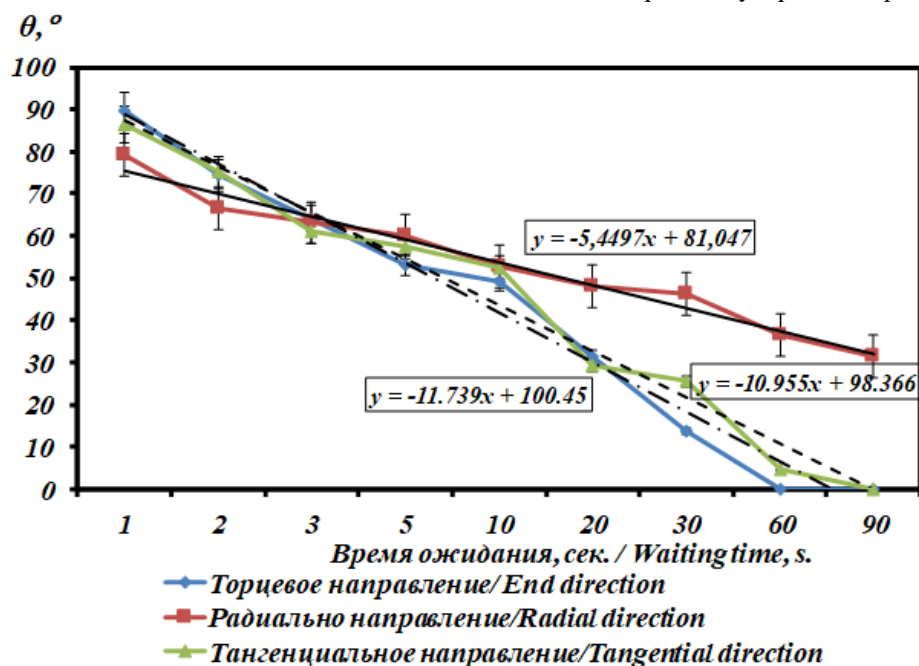


Рисунок 4. Изменение динамического краевого угла смачивания (θ) дистиллированной водой древесины берёзы в трех направлениях от времени нахождения капли на поверхности древесины (90 с)

Figure 4. Change in the dynamic edge angle of wetting (θ) with distilled water of birch wood in three directions from the time of the drop on the surface of the wood (90 seconds).

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

На рис. 5 представлены результаты определения угла контакта между древесиной березы и отработанным моторным маслом. В результате было установлено значительное снижение θ от 5 до 30 раз в процессе межфазного взаимодействия в трех взаимно перпендикулярных направлениях относительно дистиллированной воды (рис. 4, 5).

На рис. 6 представлены результаты определения условной вязкости отработанного моторного масла в диапазоне температур от 0 до 120 градусов. Полученная зависимость графически выражается гиперболой. Условная вязкость снижается с

58 до 15с при 600С и практически не меняется (на 3с) при повышении температуры до 1200С.

На рис. 7 представлены результаты сравнения динамического (а) и статического (б) краевого угла смачивания древесины березы отработанным моторным маслом и дистиллированной водой в наиболее пропитываемом торцовом направлении (рис. 4, 5).

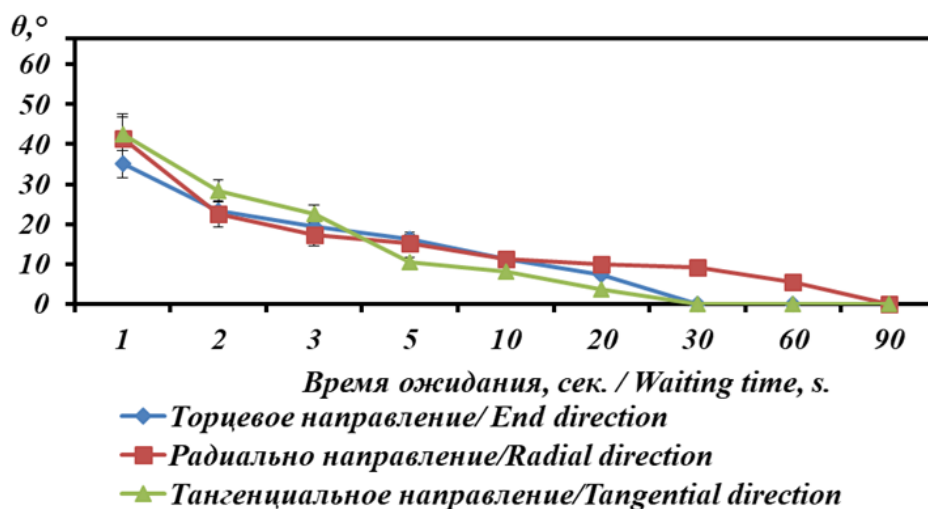


Рисунок 5. Изменение угла контакта отработанного моторного масла на древесине

Figure 5. Changing the contact angle of spent engine oil on wood

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

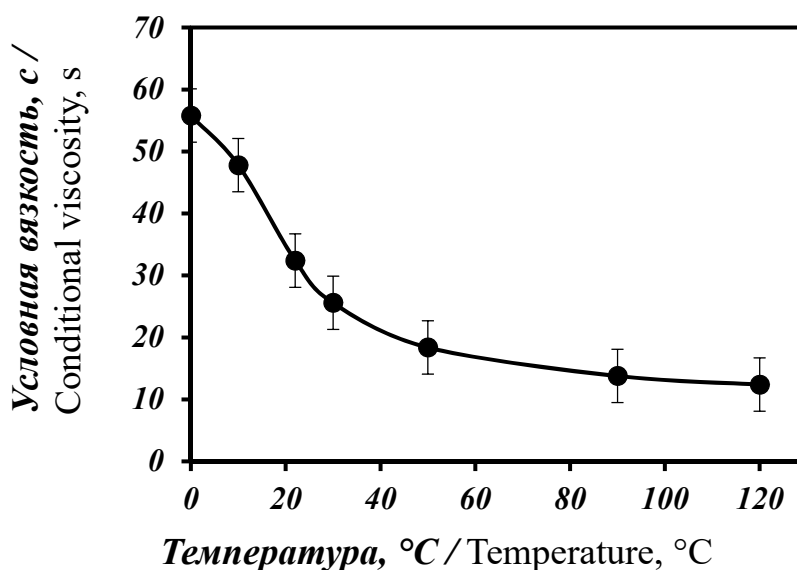


Рисунок 6. Изменение условной вязкости отработанного моторного масла при повышении температуры

Figure 6. Change in the conditional viscosity of used engine oil with increasing temperature

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Значение углов контакта в первую секунду после нанесения дистиллированной воды и отработанного моторного масла на торцовую поверхность древесины составлял $86^{\circ}44'$ и $37^{\circ}03'$ соответственно. В течение последующего времени до 30 секунд

происходит значительное снижение угла контакта для исследуемых жидкостей. Полное впитывание отработанного моторного масла происходит через 30 секунды (рис. 76) при угле контакта между поверхностью древесины и водой $25^{\circ}5'$. Максималь-

ное проникновение пропиточного состава в древесину происходит через 90 секунду, и угол контакта снижается до минимального значения (рис. 7). Исследование угла контакта в статическом режиме позволяет установить его значение через длительные промежутки времени и визуализировать изменение его значений без рассмотрения процесса в динамике, что вносит определённую ошибку при

определении этой величины. Установление динамического краевого угла смачивания позволяет количественно определить изменение угла контакта на протяжении всего процесса пропитки. Изменение угла контакта в динамике позволяет наблюдать изменение состояния системы древесина - пропиточный материал и тем самым оценить процесс межфазного взаимодействия в этой системе.

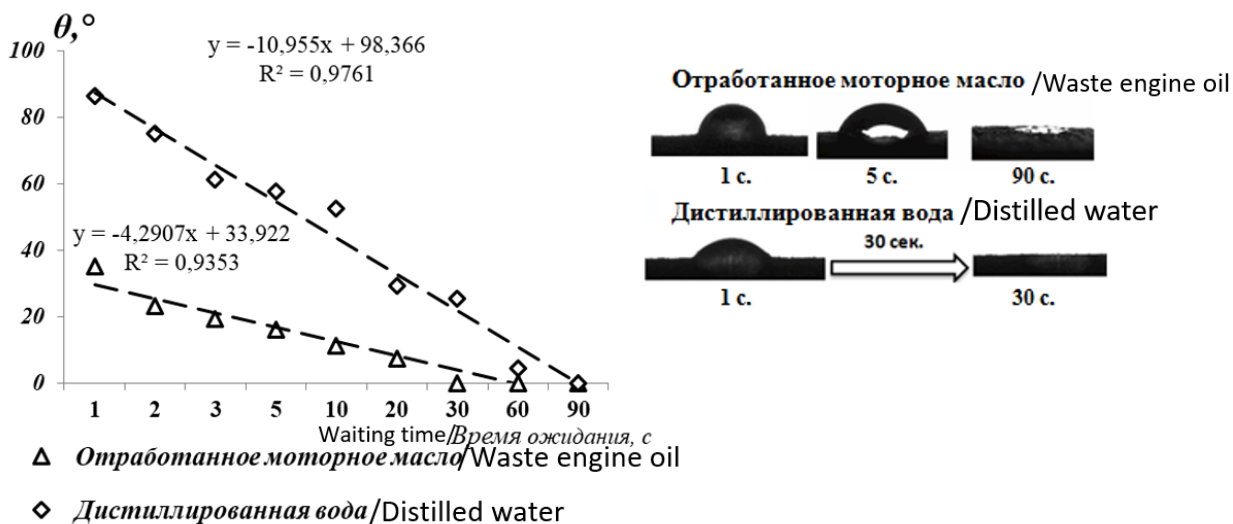


Рисунок 7. Сравнение краевого угла смачивания отработанным моторным маслом и дистиллированной водой в торцовом направлении

Figure 7. Comparison of the edge angle of wetting with spent engine oil and distilled water in the end direction

Источник: собственные данные авторов
Source: authors' own data

Значение углов контакта в первую секунду после нанесения дистиллированной воды и отработанного моторного масла на торцовую поверхность древесины составлял 86°44' и 37°03' соответственно. В течение последующего времени до 30 секунд происходит значительное снижение угла контакта для исследуемых жидкостей. Полное впитывание отработанного моторного масла происходит через 30 секунды (рис. 76) при угле контакта между поверхностью древесины и водой 25°5'. Максимальное проникновение пропиточного состава в древесину происходит через 90 секунду и угол контакта снижается до минимального значения (рис. 76). Исследование угла контакта в статическом режиме позволяет установить его значение через длительные промежутки времени и визуализировать изменение его значений без рассмотрения процесса в

динамике, что вносит определённую ошибку при определении этой величины. Установление динамического краевого угла смачивания позволяет количественно определить изменение угла контакта на протяжении всего процесса пропитки. Изменение угла контакта в динамике позволяет наблюдать изменение состояния системы древесина-пропиточный материал и тем самым оценить процесс межфазного взаимодействия в этой системе.

Заключение

На межфазное взаимодействие между поверхностью древесины и пропитывающей жидкостью влияет несколько факторов, в том числе краевой угол смачивания. Краевой угол является мерой смачиваемости поверхности древесины и может влиять на способность пропитывающей жидкости проникать в древесину. Анализ динамического и

статического краевых углов смачивания дают возможность установить значительное снижение их величин при использовании пропиточного состава на основе отработанного моторного масла, по-видимому, в результате межфазного взаимодействия между древесиной и гидрофобной матрицей пропиточного состава. Анализ динамического и статического краевых углов смачивания пропитанной ОММ древесины позволил установить значительное повышение этих углов сравнительно с данными, полученными для непропитанной древесины. Краевые углы возрастают, по-видимому, в ре-

зультате межфазного взаимодействия функциональных групп древесины и основных компонентов пропиточного состава, приводящее к образованию гидрофобной поверхности. Краевой угол смачивания может предоставить ценную информацию о качестве пропитки древесины и может использоваться в качестве показателя эффективности пропиточных жидкостей в обеспечении защиты от влаги и гниения. Меньший контактный угол обычно указывает на лучшую пропитку и улучшенную защиту, что делает его важным параметром, который следует учитывать при оценке процессов пропитки древесины.

Список литературы

1. Spear M. J. et al. Review of functional treatments for modified wood //Coatings. – 2021. – Т. 11. – №. 3. – С. 327. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11030327>
2. Song K. et al. High temperature and fire behavior of hydrothermally modified wood impregnated with carbon nanomaterials //Journal of hazardous materials. – 2020. – Т. 384. – С. 121283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121283>
3. Bayani S., Taghiyari H. R., Papadopoulos A. N. Physical and mechanical properties of thermally-modified beech wood impregnated with silver nano-suspension and their relationship with the crystallinity of cellulose //Polymers. – 2019. – Т. 11. – №. 10. – С. 1538. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101538>
4. Li P. et al. Preparation and characterization of sodium silicate impregnated Chinese fir wood with high strength, water resistance, flame retardant and smoke suppression //Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – С. 1043-1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.035>
5. Kurkowiak K., Emmerich L., Militz H. Wood chemical modification based on bio-based polycarboxylic acid and polyols—status quo and future perspectives //Wood Material Science & Engineering. – 2022. – Т. 17. – №. 6. – С. 1040-1054. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1925961>
6. Sangregorio A. et al. Humin based resin for wood modification and property improvement // Green Chemistry. – 2020. – Т. 22. – №. 9. – С. 2786-2798. DOI: [10.1039/C9GC03620B](https://doi.org/10.1039/C9GC03620B)
7. Wu S. S., Tao X., Xu W. Thermal conductivity of Poplar wood veneer impregnated with graphene/polyvinyl alcohol //Forests. – 2021. – Т. 12. – №. 6. – С. 777. <https://doi.org/10.3390/f12060777>
8. Dong Y. et al. Environmentally benign wood modifications: a review //ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2020. – Т. 8. – №. 9. – С. 3532-3540. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00427>
9. Lykidis C., Kotrotsiou K., Tsihlakis A. Reducing set-recovery of compressively densified poplar wood by impregnation–modification with melamine–formaldehyde resin //Wood Material Science & Engineering. – 2020. – Т. 15. – №. 5. – С. 269-277. <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1594365>
10. Lin, W., Huang, Y., Li, J. et al. Cellulose (2018) 25: 7341. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2074-y>
11. Čermák P. et al. Wood-water interactions of thermally modified, acetylated and melamine formaldehyde resin impregnated beech wood //Holzforschung. – 2022. – Т. 76. – №. 5. – С. 437-450. <https://doi.org/10.1515/hf-2021-0164>
12. Biziks, V., Bicke, S., and Militz, H. (2019). Penetration depth of phenol-formaldehyde (PF) resin into beech wood studied by light microscopy. Wood Sci. Technol. 53: 165–176, <https://doi.org/10.1007/s00226-018-1058-2>.

13. Baar J. et al. Effect of hemp oil impregnation and thermal modification on European beech wood properties //European Journal of Wood and Wood Products. – 2021. – Т. 79. – №. 1. – С. 161-175. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01615-9>
14. Shen X. et al. Effect of furfurylation on hierarchical porous structure of poplar wood //Polymers. – 2020. – Т. 13. – №. 1. – С. 32. <https://doi.org/10.3390/polym13010032>
15. Li W. et al. Understanding the effect of combined thermal treatment and phenol–formaldehyde resin impregnation on the compressive stress of wood //Wood Science and Technology. – 2022. – Т. 56. – №. 4. – С. 1071-1086. <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01400-2>
16. Popescu C. M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products—An overview //Fire and Materials. – 2020. – Т. 44. – №. 1. – С. 100-111. <https://doi.org/10.1002/fam.2779>
17. Seng Hua Lee, Zaidon Ashaari, Wei Chen Lum, Juliana Abdul Halip, Aik Fei Ang, Li Peng Tan, Kit Ling Chin, Paridah Md Tahir, Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review, Construction and Building Materials, Volume 181, 2018, Pages 408-419, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.058>.
18. Impregnation of wood with waste engine oil to increase water-and bio-resistance / L. Belchinskaya, K. V. Zhuzhukin, T. Ishchenko, A. Platonov. Forests. 2021; 12 (12): 1762. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121762>.
19. Tomak E. D. Surface wettability of boron and oil-treated wood //Cerne. – 2022. – Т. 28. DOI: 10.1590/01047760202228013058
20. Повышение водостойкости древесины пропиточным составом на основе растительного масла с нанопорошком диоксида кремния / Е. В. Томина, А. И. Дмитренко, К. В. Жужукин [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 68-79. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/6>.
21. Влияние ультразвукового диспергирования пропиточного состава древесины на её гидрофобизацию / Л. И. Бельчинская, К. В. Жужукин, Л. А. Новикова [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9, № 2(34). – С. 126-136. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/14>.

References

1. Spear M. J. et al. Review of functional treatments for modified wood //Coatings. – 2021. – Т. 11. – №. 3. – С. 327. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11030327>
2. Song K. et al. High temperature and fire behavior of hydrothermally modified wood impregnated with carbon nanomaterials //Journal of hazardous materials. – 2020. – Т. 384. – С. 121283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121283>
3. Bayani S., Taghiyari H. R., Papadopoulou A. N. Physical and mechanical properties of thermally-modified beech wood impregnated with silver nano-suspension and their relationship with the crystallinity of cellulose //Polymers. – 2019. – Т. 11. – №. 10. – С. 1538. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101538>
4. Li P. et al. Preparation and characterization of sodium silicate impregnated Chinese fir wood with high strength, water resistance, flame retardant and smoke suppression //Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – С. 1043-1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.035>
5. Kurkowiak K., Emmerich L., Militz H. Wood chemical modification based on bio-based polycarboxylic acid and polyols—status quo and future perspectives //Wood Material Science & Engineering. – 2022. – Т. 17. – №. 6. – С. 1040-1054. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1925961>
6. Sangregorio A. et al. Humic based resin for wood modification and property improvement //Green Chemistry. – 2020. – Т. 22. – №. 9. – С. 2786-2798. DOI: 10.1039/C9GC03620B
7. Wu S. S., Tao X., Xu W. Thermal conductivity of Poplar wood veneer impregnated with graphene/polyvinyl alcohol //Forests. – 2021. – Т. 12. – №. 6. – С. 777. <https://doi.org/10.3390/f12060777>
8. Dong Y. et al. Environmentally benign wood modifications: a review //ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2020. – Т. 8. – №. 9. – С. 3532-3540. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00427>

9. Lykidis C., Kotrotsiou K., Tsihklakis A. Reducing set-recovery of compressively densified poplar wood by impregnation–modification with melamine–formaldehyde resin //Wood Material Science & Engineering. – 2020. – Т. 15. – №. 5. – С. 269-277. <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1594365>
10. Lin, W., Huang, Y., Li, J. et al. Cellulose (2018) 25: 7341. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2074-y>
11. Čermák P. et al. Wood-water interactions of thermally modified, acetylated and melamine formaldehyde resin impregnated beech wood //Holzforschung. – 2022. – Т. 76. – №. 5. – С. 437-450. <https://doi.org/10.1515/hf-2021-0164>.
12. Biziks, V., Bicke, S., and Militz, H. (2019). Penetration depth of phenol-formaldehyde (PF) resin into beech wood studied by light microscopy. Wood Sci. Technol. 53: 165–176, <https://doi.org/10.1007/s00226-018-1058-2>.
13. Baar J. et al. Effect of hemp oil impregnation and thermal modification on European beech wood properties //European Journal of Wood and Wood Products. – 2021. – Т. 79. – №. 1. – С. 161-175. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01615-9>.
14. Shen X. et al. Effect of furfurylation on hierarchical porous structure of poplar wood //Polymers. – 2020. – Т. 13. – №. 1. – С. 32. <https://doi.org/10.3390/polym13010032>.
15. Li W. et al. Understanding the effect of combined thermal treatment and phenol–formaldehyde resin impregnation on the compressive stress of wood //Wood Science and Technology. – 2022. – Т. 56. – №. 4. – С. 1071-1086. <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01400-2>.
16. Popescu C. M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products—An overview //Fire and Materials. – 2020. – Т. 44. – №. 1. – С. 100-111. <https://doi.org/10.1002/fam.2779>.
17. Seng Hua Lee, Zaidon Ashaari, Wei Chen Lum, Juliana Abdul Halip, Aik Fei Ang, Li Peng Tan, Kit Ling Chin, Paridah Md Tahir, Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review, Construction and Building Materials, Volume 181, 2018, Pages 408-419, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.058>.
18. Impregnation of wood with waste engine oil to increase water-and bio-resistance / L. Belchinskaya, K. V. Zhuzhukin, T. Ishchenko, A. Platonov. Forests. 2021; 12 (12): 1762. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121762>.
19. Tomak E. D. Surface wettability of boron and oil-treated wood //Cerne. – 2022. – Т. 28. DOI: 10.1590/01047760202228013058.
20. Povyshenie vodostojkosti drevesiny propitochnym sostavom na osnove rastitel'nogo masla s nanoporoshkom dioksida kremniya [Increasing the water resistance of wood with an impregnating composition based on vegetable oil with silicon dioxide nanopowder] / E. V. Tomina, A. I. Dmitrenkov, K. V. Zhuzhukin [etc.] // Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering Journal]. – 2022. – V. 12, No. 2(46). – P. 68-79 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/6>.
21. Vliyanie ul'trazvukovogo dispergirvaniya propitochnogo sostava drevesiny` na eyo gidrofobizaciyu / L. I. Bel'chinskaya, K. V. Zhuzhukin, L. A. Novikova [etc.] // Lesotekhnicheskii zhurnal. – 2019. – V. 9, No. 2(34). – P. 126-136 (in Russian). DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/14.

Сведения об авторах

Жужукин Константин Викторович – преподаватель кафедры химии, м.н.с. НИИ ИТЛК Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; e-mail: kinkon18@yandex.ru.

Бельчинская Лариса Ивановна – профессор кафедры химии Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; e-mail: chem@vglta.vrn.ru.

Томина Елена Викторовна – доктор химических наук, зав. кафедрой химии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж,

Российская Федерация, 394087; профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tomina-e-v@yandex.ru.

Зяблов Александр Николаевич – доктор химических наук, профессор кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация.

Ву Хоанг Иен – аспирант кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж; Преподаватель кафедры Менеджмента качества и безопасности пищевых продуктов, Пищевой Промышленный Университет Хошимина, Вьетнам

Чуйков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, Республика Беларусь, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

Information about the authors

Konstantin V. Zhuzhukin – Lecturer, Department of Chemistry, Junior Researcher NII ITLC Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; e-mail: kinkon18@yandex.ru.

Larisa I. Belchinskaya – DSc in Engineering, Professor, department of chemistry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; e-mail: chem@vglta.vrn.ru.

Elena V. Tomina – Doctor of Chemical Sciences, Head. Department of Chemistry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: tomina-e-v@yandex.ru.

Alexander N. Zyablov – Doctor of Chemistry, Professor of the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Wu Hoang Yen – Postgraduate Student, Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Voronezh; Lecturer, Department of Quality and Food Safety Management, Ho Chi Minh Food Industrial University, Vietnam

Alexey S. Chuikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarussian State Technological University, 13a Sverdlov str., Minsk, 220006, Belarus, e-mail: offlex88@belstu.by.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/15>

УДК 674.047.3; 674-416



Продолжительность сушки березового шпона в фанерном производстве

Егор М. Разиньков¹, rasinkov50@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4057-4645>

Владимир А. Шамаев¹, drevstal@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Екатерина В. Кантиева¹, ekantieva@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>

Татьяна Л. Ищенко¹, tl_ischenko@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-2118-2160>

Елена В. Томина^{1,2}, tomina-e-v@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

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

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

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская площадь, 1, г. Воронеж, 394018, Российская Федерация

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

Несмотря на то, что в настоящее время существует ряд расчетных формул для определения продолжительности сушки лущеного шпона, для работников фанерных предприятий такой расчет вызывает сложности. Связано это с тем, что в ряд расчетных формул входят величины, которые необходимо выбирать из различных источников применительно к конкретной технологии фанеры. Мы пришли к выводу, что эти формулы можно значительно упростить. Кроме того, целесообразно было выяснить как изменяется качество поверхности шпона при его сушке по сравнению с качеством поверхности сырого шпона. Таким образом, цель работы состояла: в аналитических расчетах продолжительности сушки березового шпона различных толщин в технологии фанеры применительно к отечественному сушильному оборудованию с упрощением формул, облегчающих расчеты работниками фанерных предприятий; в изучении влияния продолжительности сушки шпона на производственную мощность предприятия; в исследовании качества поверхности сырого и сухого шпона при сушке его на отечественном оборудовании в роликовых сушилках. В результате исследований: получили простые формулы для расчета продолжительности сушки березового шпона различных толщин при разных условиях поставки фанерного сырья, которые вместе с наглядными графическими зависимостями могут оказать существенную помощь работникам фанерных предприятий; показана тесная взаимосвязь между продолжительностью сушки шпона и производственной мощностью фанерного завода; приведены результаты исследований изменения качества поверхности сырого шпона после его сушки в роликовых сушилках.

Ключевые слова: фанера, березовый шпон, продолжительность сушки шпона, паровые и газовые сушилки

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Для цитирования: Продолжительность сушки березового шпона в фанерном производстве / Е. М. Разиньков, В. А. Шамаев, Е. В. Кантиева, Т. Л. Ищенко, Е. В. Томина, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 222–235. – Библиогр.: с. 231–234 (21назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/15>.

Поступила 12.03.2023. Пересмотрена 11.04.2023. Принята 15.04.2023. Опубликована онлайн 15.05.2023.


Duration of drying the birch veneer in the plywood production

Egor M. Razinkov¹, rasinkov50@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-4057-4645>

Vladimir A. Shamaev¹, drevstal@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Ekaterina V. Kantieva¹,  ekantieva@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>

Tatiana L. Ishchenko¹, tl_ishchenko@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-2118-2160>

Elena V. Tomina^{1,2}, tomina-e-v@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

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

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

²Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation

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

Abstract

Despite the fact that currently there are a number of calculation formulas for determining the drying time of peeled veneer, they still cause difficulties for employees of plywood enterprises. We have come to the conclusion that these formulas can be greatly simplified. Moreover, it was necessary to find out the changes between the surface quality of the dried and raw veneer. The purpose of the work was to perform analytical calculations of the drying time of birch veneer of various thicknesses in plywood technology in relation to domestic drying equipment by simplifying the calculation formulas to make them easier for employees of plywood enterprises; to study the effect of the drying time of veneer on the production capacity of the enterprise; to study the surface quality of raw and dry veneer when drying it on domestic equipment in roller dryers. As a result of the research simple formulas were obtained that together with visual graphical dependences can significantly help employees of plywood enterprises; a close relationship between the drying time of veneer and the production capacity of a plywood enterprise is shown; the changes in the surface quality of raw veneer after drying in roller dryers are given.

Keywords: *plywood, birch veneer, veneer drying time, steam and gas dryers*

Acknowledgments: the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this paper/

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

For citation: Razinkov E.M., Shamaev V.A., Kantieva E.V., Ishchenko T.L., Tomina E.V., Chuikov A.S. (2023). Duration of drying the birch veneer in the plywood production. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 222-235 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/15>.

Received 12.03.2023. *Revised* 11.04.2023. *Accepted* 15.04.2023. *Published online* 15.05.2023.

Введение

Технология фанеры относится к ресурсосберегающим технологиям. В отечественной и зарубежной практике в фанерном производстве в качестве основной породы древесины используется береза. Основными преимуществами этой породы перед другими породами является в основном ее пластичность, прямослойность, что позволяет получать шпон хорошего качества (с меньшим количеством трещин, невысокой шероховатостью поверхности и др.) [1-3]. В соответствии с техническими требованиями ГОСТ 99-2016 шпон должен иметь толщины, мм: 0,55; 0,75; 0,95; 1,15; от 1,25 до 4,0 с градацией 0,25. В настоящее время на фанерных предприятиях в основном используется шпон, мм: 1,15; 1,25 до 2,0 с градацией 0,25 [4]. По этому стандарту конечная влажность шпона должна быть 4 - 8 % (чаще всего около 8%) независимо от начальной его влажности. Начальная влажность шпона может быть различной в зависимости от способа поставки (автомобильным, железнодорожным транспортом или сплавом) и находится в пределах 60-110 % [5]. Несмотря на то, что лущеный шпон в основном используется для производства клееной фанеры на карбамидо-, фенолоформальдегидных и других видах смол, но он также применяется и для других изделий (специальных труб и др.) [6-8]. Свойства шпона можно изменять путем предварительной обработки химическими веществами [9-11], термомодифицированием [12-14] или уплотнением [15]. Сушка шпона осуществляется в роликовых газовых и паровых сушилках. Для сушки полноформатного шпона используются роликовые газовые сушилки моделей СРГ-25, СРГ-25М, СРГ-50-2 в центре которых температура агента сушки составляет 170-180 °С. Паровые сушилки используются для сушки кускового шпона в основном моделей СУР-4, СУР-5, СУР-6 в центре которых температура агента сушки составляет 120-130 °С. Температура сушки шпона оказывает влияние на свойства изготавливаемой из него фанеры [16]. Сушка шпона является одной из главных технологических операций, а продолжительность сушки во многом определяет производственную мощность предприятия.

Тепловой эффект удаления влаги из древесины, шпона при их сушке представляет собой сложный процесс [17, 18]. Известно, что продолжительность сушки шпона в роликовых сушилках определяется по известной формуле²⁰, которая после подстановки зависимостей коэффициентов N_p и K_p от различных факторов принимает следующий вид

$$\tau = \left(\frac{W_n - 30}{N_p} + \frac{2,3}{K_p} \cdot Lg \frac{30}{W_k} \right) K_n \cdot K_{ц} =$$

$$= \left(\frac{308s^{1.3} (W_n - 30)}{t^{1.7} v^{0.25} a} + \frac{51750s^{1.3}}{at^{1.9} v^{0.2}} Lg \frac{30}{W_k} \right) K_n \cdot K_{ц}, \text{ мин},$$

(1)

где: W_n , W_k – начальная и конечная влажность шпона, %; 30 – влажность шпона, соответствующая переходу от периода постоянной скорости сушки к периоду убывающей скорости; N_p – скорость сушки в период постоянного ее значения зависящий от средней температуры в сушилке и толщины шпона, %/мин; K_p – коэффициент продолжительности сушки в период убывающей скорости сушки зависящий от средней температуры в сушилке и толщины шпона; K_n – коэффициент, учитывающий породу древесины (для березы равен 1,0); $K_{ц}$ – коэффициент, учитывающий направление циркуляции агента сушки (0,9 при продольной циркуляции); t – температура агента сушки, °С; v – скорость агента сушки, м/с; s – толщина шпона, мм.

Однако для практического использования эта формула является очень громоздкой. Для работников предприятий целесообразно иметь более удобные формулы, с наглядными графическими зависимостями. Применительно к нашей цели исследования эти формулы можно преобразовать в более простой и удобный для практического использования вид.

Производственная мощность фанерного завода [19] тесно связана с продолжительностью сушки шпона наряду с оттаиванием и прогревом карандашей [20]. Режимы сушки лущеного шпона тесно связаны с качественными показателями конечного продукта – фанеры, а также с энергоэффективностью её обработки резанием [21]. Для

²⁰ Кириллов А.Н., Карасев Е.И. Технология производства фанеры. М., «Лесная промышленность», 1974.

удобства представления материала по этому вопросу все расчетные формулы и полученные аналитические расчеты будут приведены ниже.

Как показали ранее проведенные исследования качество поверхности лущеного сырого и сухого шпона отличается между собой при сушке его в отечественных роликовых сушилках. Результаты этих исследований приведены ниже.

Материалы и методы

Предмет и объект исследования

Материалом для исследования принят березовый лущеный шпон различных толщин, предусмотренных ГОСТ 99-2016.

Толщина шпона составляла, в мм: 1,15; 1,25-2,0 с градацией 0,25 мм. Начальная влажность шпона принята равной 60% (в расчете на автомобильную или железнодорожную поставку сырья) и 110% (в расчете поставки сырья сплавом). Конечная влажность шпона принята равной 8%.

Дизайн исследования

В качестве сушильного оборудования приняты отечественные сушилки модели которых приведены выше. Температура в центре газовых сушилок принята 180 °С, а в центре паровых сушилок 120 °С. Известные сложные расчетные формулы преобразовали в более простые зависимости. Микроскопические исследования поверхностей сырого и сухого шпона получены методом растровой электронной микроскопии на микроскопе «KarlZeissJena», а шероховатость поверхности шпона определяли по приборам ТСП-4 и МИС-11.

Анализ данных

После проверки распределения вариант (для 5-кратной повторности) в зависимости от толщины шпона на соответствие нормальному распределению, была вычислена дескриптивная статистика и осуществлена визуализация средних значений точечным графиком с отображением среднеквадратического отклонения средних вариант (в виде вискеро-ров). Использовали ПО MicrosoftExcel, версия 2013.

Результаты и обсуждение

Для условий автомобильной или железнодорожной поставки сырья начальную его влажность примем равной 60 %, конечную влажность 8 %, значения коэффициентов K_p и K_c примем соответственно равными 1,0 и 0,9. При этих значениях общая формула 1 преобразуется в следующий вид.

$$\tau = 27/N_p + 1,186/K_p, \text{ мин} \quad (2)$$

Для условий поставки сырья сплавом примем его начальную влажность 90 %, конечную влажность 8 %, значения коэффициентов K_p и K_c примем также, соответственно, равными 1,0 и 0,9. При этом формула преобразуется в следующий вид.

$$\tau = 54/N_p + 1,186/K_p, \text{ мин} \quad (3)$$

На рис. 1 и 2 приведены графические зависимости коэффициентов N_p и K_p от толщины шпона по нашим расчетам и по известным численным данным (хотя численные данные [3] представлены, в том числе, и для некоторых толщин шпона не входящих в ГОСТ 99-2016 -1,00; 1,80; 2,00 мм). Из графиков следует, что характер зависимостей нелинейный.

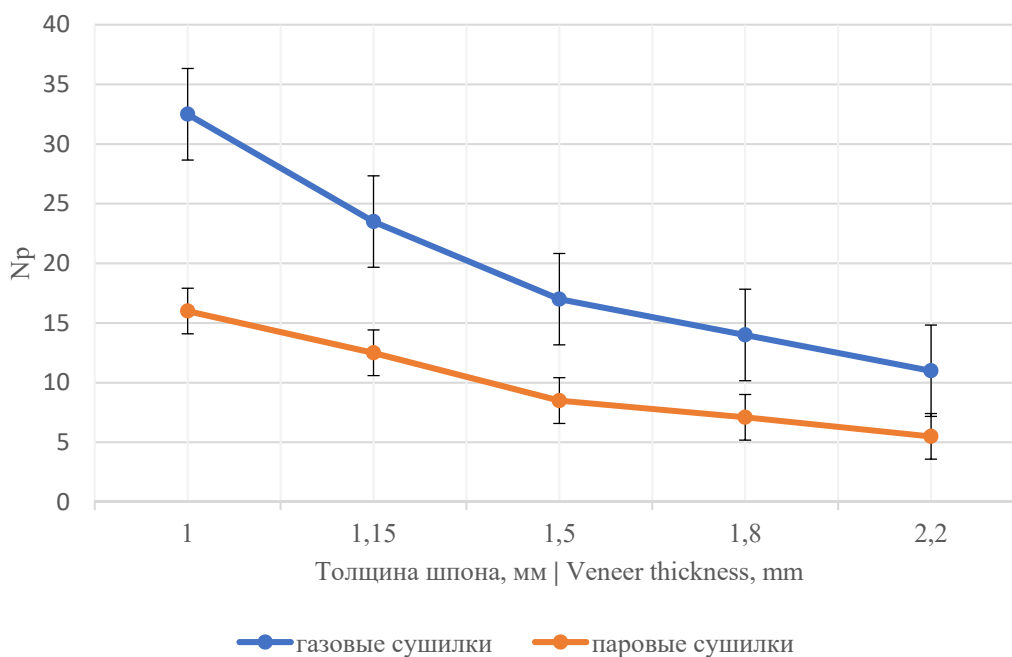


Рисунок 1. Зависимость коэффициента N_p от толщины шпона S при его сушке в различных типах сушилок
 Figure1. Dependence of the coefficient N_p on the thickness of the veneer S dried in various types of dryers
 Источник: собственные результаты авторов
 Source: author's results

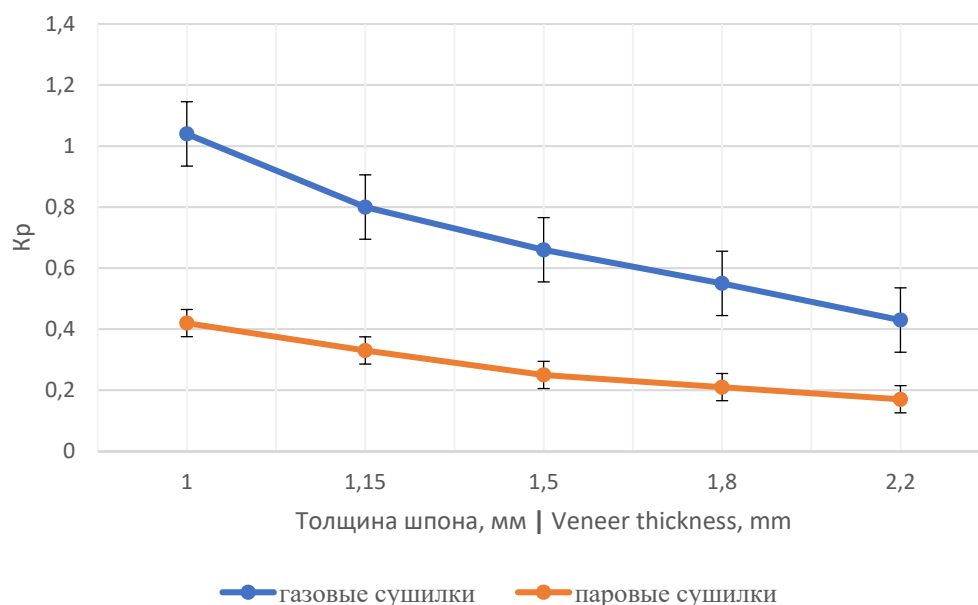


Рисунок 2. Зависимость коэффициента K_p от толщины шпона S при его сушке в различных типах сушилок
 Figure2. Dependence of the coefficient of K_p on the thickness of the veneer S dried in various types of dryers
 Источник: собственные результаты авторов
 Source: author's results

Исходя из данных, в табл. 1 приведены значения величин N_p и K_p для рассматриваемых нами толщин шпона для газовых сушилок в центре кото-

рых температура агента сушки составляет 180 °С, а в табл. 2 – для паровых сушилок в центре которых температура агента сушки составляет 120 °С (дан-

ные для толщин 1,25; 1,75 и 2,00 мм получены методом интерполяции).

Таблица 1

Значения величин N_p и K_p применительно к сушке шпона различных толщин в газовых сушилках

Table 1

The values of N_p and K_p in relation to drying veneer of various thicknesses in gas dryers

Толщина шпона, мм Veneer thickness, mm	Значения коэффициентов Coefficient values	
	N_p	K_p
1,15	23,5	1,15
1,25	21,6	1,25
1,50	17,0	1,50
1,75	14,5	1,75
2,00	12,5	2,00

Таблица 2

Значения величин N_p и K_p применительно к сушке шпона различных толщин в паровых сушилках

Table 2

The values of N_p and K_p in relation to drying veneer of various thicknesses in steam dryers

Толщина шпона, мм Veneer thickness, mm	Значения коэффициентов Coefficient values	
	N_p	K_p
1,15	12,5	0,33
1,25	11,4	0,31
1,50	8,5	0,25
1,75	8,0	0,20
2,00	6,4	0,16

В табл. 3 и 4 приведены значения продолжительности сушки шпона различных толщин в газовых и паровых сушилках при автомобильной, железнодорожной поставке сырья и сплавом, вычисленные по формулам 2 и 3.

Для наглядности полученных результатов на рис. 3 и 4 приведены графические зависимости продолжительности сушки березового шпона различных толщин в газовых и паровых сушилках при различной поставке сырья.

Таблица 3

Продолжительность сушки шпона в газовых сушилках различных толщин в зависимости от способа поставки сырья

Table 3

The duration of drying the veneer of various thicknesses in gas dryers depending on the method of delivery of raw materials

Толщина шпона, мм Veneer thickness, mm	Способ поставки сырья The method of delivery of raw materials	
	автомобильная и железнодорожная road, railroad	Сплавом rafting
1,15	2,63	3,78
1,25	2,81	4,06
1,50	3,39	4,98
1,75	3,72	5,57
2,00	4,63	6,79

Таблица 4

Продолжительность сушки шпона в паровых сушилках различных толщин в зависимости от способа поставки сырья

Table 4

The duration of drying the veneer of various thicknesses in steam dryers depending on the method of delivery of raw materials

Толщина шпона, мм Veneer thickness, mm	Способ поставки сырья The method of delivery of raw materials	
	автомобильная и железнодорожная road, railroad	Сплавом rafting
1,15	5,75	7,91
1,25	6,20	8,57
1,50	7,92	11,09
1,75	9,31	12,68
2,00	11,63	15,85

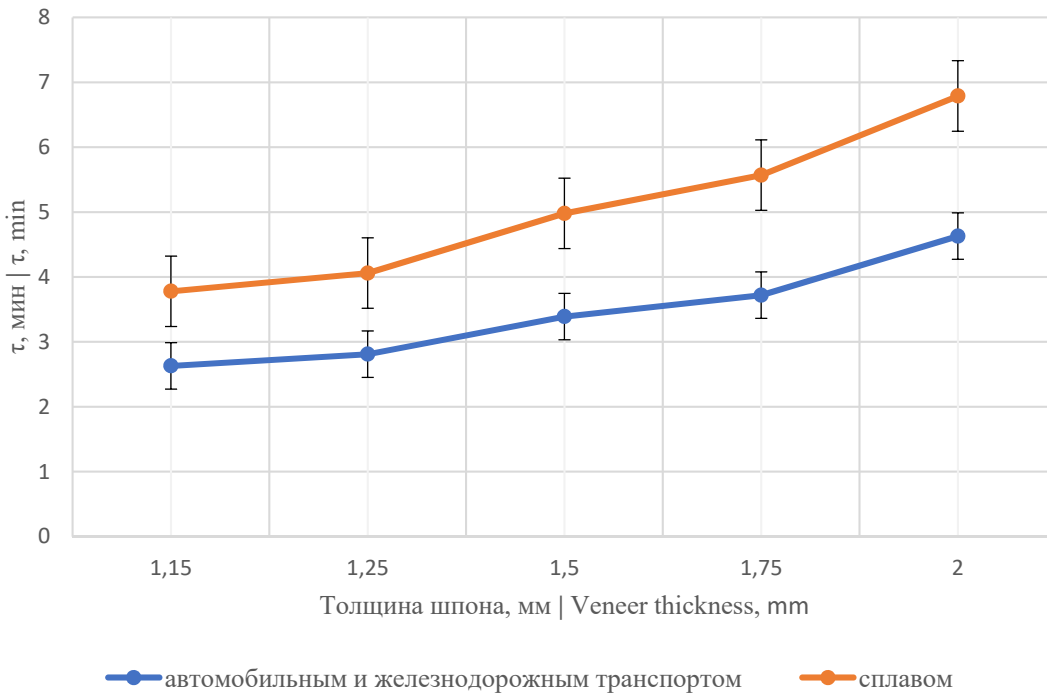


Рисунок 3. Зависимость продолжительности сушки шпона τ различных толщин S в газовых сушилках при различной поставке сырья

Figure 3. Dependence of the drying time of veneer τ of various thicknesses S in gas dryers delivered by different methods

Источник: собственные результаты авторов

Source: author's results

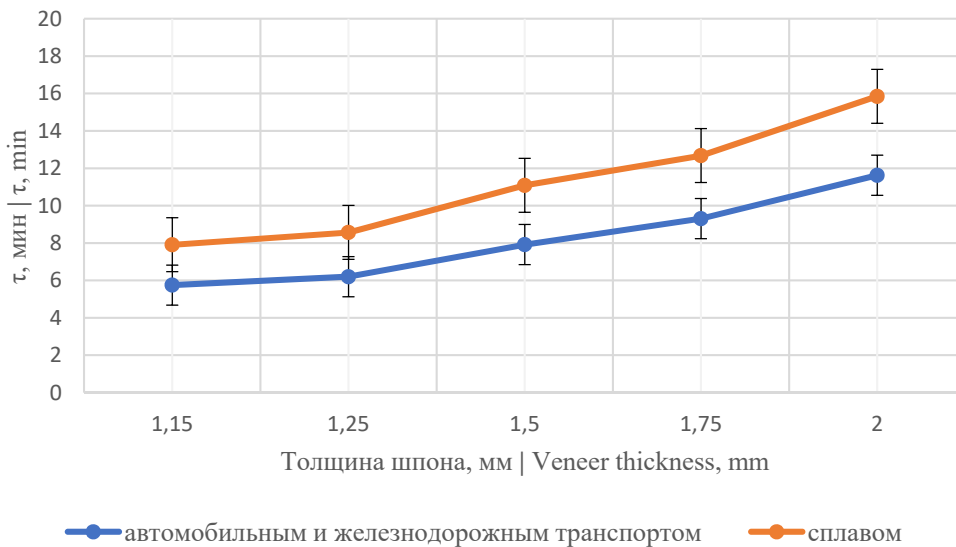


Рисунок 4. Зависимость продолжительности сушки шпона τ различных толщин S в паровых сушилках при различной поставке сырья

Figure 4. Dependence of the drying time of veneer τ of various thicknesses S in steam dryers delivered by different methods

Источник: собственные результаты авторов

Source: author's results

Приведенные на рис. 3 и 4 кривые имеют нелинейный характер и представлены в виде ломаных кривых, что связано с нелинейным характером зависимостей коэффициентов N_p и K_p от толщины шпона (о чем указывалось выше).

Полученный на лущильных станках шпон часто имеет недопустимый по ГОСТ 99-2016 дефект для всех 5 сортов шпона как для шпона лиственных, так и хвойных пород древесины – ворсистость. Она характеризуется присутствием на поверхности материала часто расположенных не полностью отделенных волокон древесины. Причин появления на поверхности шпона ворсистости несколько, таких как перегрев древесины на участке гидротермической обработки чураков или кряжей, использование тупого лущильного ножа и др. [20]. Кроме того, при лущении шпона на морально и физически устаревших лущильных станках на поверхности шпона образуется и другой дефект – рябь. Она характеризуется присутствием на поверхности шпона часто расположенных мелких углублений ориентированных вдоль волокон. Величина этих двух дефектов ГОСТом ограничивается качественным показателем сухого шпона – допустимой величиной шероховатости поверхности шпона. Этот параметр не должен превышать 200 мкм для шпона лиственных пород древесины и быть не более 320 мкм для шпона хвойных пород. Но как показали наши исследования при лущении березового шпона толщиной 1,5 мм на отечественных лущильных станках ЛУ 17-10 шероховатость поверхности сырого шпона может достигать величин 240- 250 мкм, что не удовлетворяет требованиям ГОСТ. На рис. 5 приведен микроснимок поверхности сырого шпона с видом указанных выше двух дефектов – ворсистости и ряби.

Однако, при использовании для сушки шпона отечественных роликовых или паровых сушилок, когда шпон прокатывается между двумя рядами роликов (верхним и нижним), происходит обжим шпона роликами. Как показали наши исследования в результате такого обжима шероховатость поверхности сухого шпона, при его сушке в сушилке СРГ-25М, значительно уменьшается в среднем на 32% и составляет 160 – 170 мкм, т. е. происхо-

дит как бы приглаживание поверхности шпона роликами.



Рисунок 5. Поверхность сырого шпона с видом дефектов – ворсистости и ряби

Figure 5. The surface of the raw veneer with the defects – wooliness and ripples

Источник: собственные результаты авторов
Source: author's results

При большом увеличении участков поверхности сырого и сухого шпона (рис. 6 и 7) наглядно видно, что после сушки шпон имеет более гладкую поверхность, чем до сушки.



Рисунок 6. Вид поверхности шпона до сушки

Figure 6. Veneer surface view before drying

Источник: собственные результаты авторов
Source: author's results

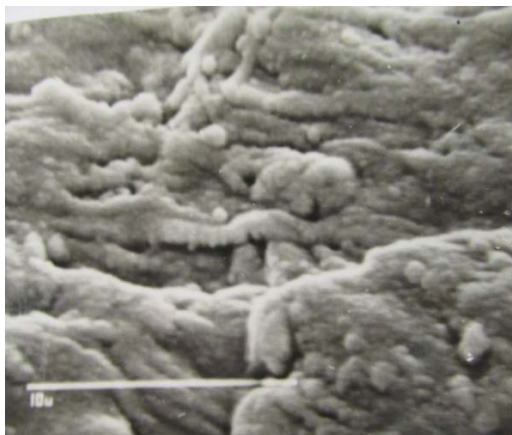


Рисунок 7. Вид поверхности шпона после его сушки

Figure 7. Veneer surface view after drying
 Источник: собственные результаты авторов
 Source: author's results

Ниже приведем влияние продолжительности сушки шпона на производительность сушилок, а следовательно и влияние этого параметра на производственную мощность фанерного предприятия. Для примера примем сушку шпона в модернизированной газовой сушилке СРГ-25М при условии поставки сырья автомобильным или железнодорожным транспортом. Паспортная производительность такой сушилки составляет 32 м³ шпона/смену. С учетом допустимого коэффициента загрузки оборудования до величины 1,1 максимальная производительность сушилки составит 35,2 м³ шпона/смену.

Как указано выше продолжительность сушки во многом определяет производственную мощность предприятия, что можно наглядно показать.

Продолжительность прохождения шпона по всей длине сушилки (по зонам сушки и охлаждения) определится по формуле

$$\tau_1 = \tau \cdot \frac{L}{l}, \text{ мин}, \quad (4)$$

где: τ – продолжительность сушки шпона в сушильной зоне, мин; L – суммарная длина камер сушки и охлаждения, м (16,36); l – длина камеры сушки, м (14,2).

Подставляя значения L и l в формулу 6, получим

$$\tau_1 = 1,152 \tau, \text{ мин} \quad (5)$$

Как видно из формул 4 и 5, величина τ_1 во многом зависит от продолжительности сушки τ .

Сменная производительность сушилки составит

$$P_{см} = T \cdot n \cdot m \cdot S \cdot b \cdot \frac{L}{\tau_1} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \text{ м}^3/\text{см}, \quad (6)$$

где T – продолжительность смены, мин; n – число листов шпона по ширине этажа (длине роликов) ($n = 2$), m – число этажей сушилки, шт (8); S – толщина листа шпона, м; b – ширина листа сухого шпона, м (для примера примем равной 1,6); L – суммарная длина камер сушки и охлаждения, м (16,36); τ_1 – продолжительность прохождения шпона через сушилку, мин (определится из формулы 5); K_1 – коэффициент, учитывающий потери времени при переходе к сушке шпона другой толщины (исходя из практики примем равным 0,7); K_2 – коэффициент использования рабочего времени сушилки (примем равным 0,9); K_3 – коэффициент заполнения сушилки по длине равен около 0,8 (исходя из практики примем равным 0,65).

В табл. 5 приведены расчетные значения величины τ_1 и $P_{см}$ в зависимости от толщины березового шпона из которых следует, что по своей производительности сушилка работает в оптимальном режиме.

Таблица 5

Значения величин τ_1 и $P_{см}$ в зависимости от толщины шпона

Table 5

The values of τ_1 and $P_{см}$ depending on the thickness of the veneer

Толщина шпона, мм The thickness of the veneer, mm	τ_1 , мин τ_1 , min	$P_{см}$, м ³ $P_{см}$, m ³
1,15	3,03	31,28
1,25	3,24	31,78
1,50	3,91	31,62
1,75	4,29	33,62
2,00	5,33	30,93

Исходя из 3-сменной работы сушильного цеха и количества рабочих суток 253, только из одной такой сушилки направляется в технологию фанеры от 23 742 до 25 518 м³ сухого шпона. Этого количе-

ства шпона будет достаточно для производства, например, фанеры общего назначения около 20 000 м³.

Выводы

1. Разработаны упрощенные расчетные формулы для определения продолжительности сушки березового шпона различных толщин в технологии фанеры применительно к отечественному сушильному оборудованию, облегчающих расчеты работниками фанерных предприятий.

2. Предложены наглядные графические зависимости продолжительности сушки от толщины шпона и условий поставки березового сырья на фанерный завод, которые могут оказать суще-

ственную помощь работникам фанерных предприятий.

3. На примере показано, насколько важным параметром является продолжительность сушки шпона в газовых и паровых отечественных сушилках при различных условиях поставки древесного сырья для выхода фанерного завода на полную производственную мощность.

4. При сушке лушеного шпона в отечественных роликовых сушилках качество его поверхности улучшается за счет приглаживания шпона роликами. За счет этого уменьшается шероховатость поверхности сухого шпона (в среднем на 32 %) шпона по сравнению с этим параметром сырого шпона.

Список литературы

1. Maximilian Pramreiter, Sabine C Bodner, Jozef Keckes, Alexander Stadlmann, Florian Feist, Georg Baumann, Emad Maawad, Ulrich Müller Predicting strength of Finnish birch veneers based on three different failure criteria. *Holzforschung*, Volume: 75, Issue: 9, Pages: 847-856. Mar 15, (2021). <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0209>.

2. Heikko Kallakas, Anti Rohumaa, Harti Vahermets, Jaan Kers Effect of Different Hardwood Species and Lay-Up Schemes on the Mechanical Properties of Plywood. *Forests*, Volume: 11, Issue: 6, Pages: 649. Jun 6, (2020). <https://doi.org/10.3390/f11060649>.

3. Héloïse Dubois, Erkki Verkasalo, Hugues Claessens Potential of Birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for Forestry and Forest-Based Industry Sector within the Changing Climatic and Socio-Economic Context of Western Europe, *Forests*, Volume: 11, Issue: 3, Pages: 336. Mar 17, (2020). <https://doi.org/10.3390/f11030336>.

4. Maximilian Pramreiter, Alexander Stadlmann, Christian Huber, Johannes Konnerth, Peter Halbauer, Georg Baumann, Ulrich Müller The Influence of Thickness on the Tensile Strength of Finnish Birch Veneers under Varying Load Angles/ *Forests*, Volume: 12, Issue: 1, Pages: 87. Jan 15, (2021). <https://doi.org/10.3390/f12010087>.

5. Wang, J., Cao, X. & Liu, H. A review of the long-term effects of humidity on the mechanical properties of wood and wood-based products. *Eur. J. Wood Prod.* 79, 245–259 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01623-9>

6. Brycki, B.E. Organic Corrosion Inhibitors / B.E. Brycki, I.H. Kowalczyk, A. Szulc и др. // *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*. InTech, 2018. С. 65-81. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.72943>.

7. Gilbert, B.P. Structural behavior of hardwood veneer-based circular hollow sections of different compactness / B.P. Gilbert, I.D. Underhill, D. Fernando etc. // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 170. – P. 557-569. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.105>.

8. Hirschmüller, S. Long-term material properties of circular hollow laminated veneer lumber sections under water saturation and cement alkaline attack / S. Hirschmüller, J. Pravida, R. Marte, M. Flach // *Wood Material Science & Engineering*. – 2019. – Vol. 14. – № 3. – P. 142-156. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1434830>.

9. Hannes Orelma, Vesa Kunnari, Akio Yamamoto, Mikko Valkonen, Lauri Rautkari, Antti Korpela Improving mechanical performance and functionality of birch veneer with mechano-enzymatic microfibrillated cellulose coating. *Cellulose*, Volume: 30, Issue: 5, Pages: 3237-3254. Jan 30, (2023)/ <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05059-1>

10. Miao Zou , Qiheng Tang , Wenjing Guo High-strength wood-based composites via laminated delignified wood veneers with different adhesive contents for structural applications. *Polymer Composites*, Volume: 43, Issue: 5, Pages: 2746-2758. Feb 26, (2022). <https://doi.org/10.1002/pc.26571>
11. Saara Hautamäki , Michael Altgen , Daniela Altgen , Erik Larnøy , Tuomas Hänninen , Lauri Rautkari The effect of diammonium phosphate and sodium silicate on the adhesion and fire properties of birch veneer. *Holzforschung*, Volume: 74, Issue: 4, Pages: 372-381. Sep 24, (2019). <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0059>
12. Anete Meija-Feldmane , Andris Morozovs , Uldis Spulle Chemical alterations of hardwood veneers due to thermal treatment. *ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, Volume: 1, Pages: 159. Jun 20, (2019) <https://doi.org/10.17770/etr2019vol1.4147>.
13. Pavlo Bekhta , Tomáš Pipiška , Vladimír Gryc , Ján Sedliačik , Pavel Král , Jozef Ráhel , Jan Vaněrek Properties of Plywood Panels Composed of Thermally Densified and Non-Densified Alder and Birch Veneers. *Forests*, Volume: 14, Issue: 1, Pages: 96-96. Jan 4, (2023). <https://doi.org/10.3390/f14010096>.
14. Ruslan Khasanshin , Ruslan R Safin , Shamil Mukhametzyanov Experimental Studies of the Physical and Mechanical Properties of Glued Building Materials Based on Modified Veneer. *Defect and Diffusion Forum*, Volume: 410, Pages: 817-822. Aug 17, (2021). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.410.817>
15. Adam Ślupecki , Anita Wronka The influence of densification time on the tensile strength and modulus of elasticity of birch veneers. *Annals of WULS, Forestry and Wood Technology*, Volume: 118, Pages: 48-54. Jul 25, (2022), <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.0488>
16. Pavlo Bekhta , Ján Sedliačik , Nataliya Bekhta Effect of Veneer-Drying Temperature on Selected Properties and Formaldehyde Emission of Birch Plywood. *Polymers*. 2020; 12 (3): 593. <https://doi.org/10.3390/polum12030593>.
17. Ермоченков, М. Г. Тепловые эффекты удаления связанной влаги из древесины / М. Г. Ермоченков, М. Ю. Кладов // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2018. – № 1. – С. 20-27. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35084788>.
18. Etuk, S.E., Agbasi, O.E. & Robert, U.W. Investigation of heat transfer and mechanical properties of *Saccharum officinarum* leaf board. *Int J Energ Water Res* 2022; 6: 95–102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42108-021-00123-7>.
19. Васильев, В. В. Структура древесного сырья на заводах древесностружечных плит разной мощности / В. В. Васильев // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2022; 238: 137-151. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.137-151>.
20. Разиньков, Е. М. Технологический процесс получения лущеного шпона: влияние внешних температурных условий на оттаивание и прогрев древесины / Е. М. Разиньков, Т. Л. Ищенко, С. П. Трофимов // *Лесотехнический журнал*. 2022; 12 (48): 141–152. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/10>.
21. Анализ силового взаимодействия дискового ножа с древесиной при бесстружечном делении / В. П. Ивановский, Д. К. Томенко, С. П. Трофимов, А. В. Киселева // *Лесотехнический журнал*. 2022; 12 (48): 130-140. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/9>.

References

1. Maximilian Pramreiter , Sabine C Bodner , Jozef Keckes , Alexander Stadlmann , Florian Feist , Georg Baumann , Emad Maawad , Ulrich Müller Predicting strength of Finnish birch veneers based on three different failure criteria. *Holzforschung*, Volume: 75, Issue: 9, Pages: 847-856. Mar 15, (2021). <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0209>.
2. Heikko Kallakas , Anti Rohumaa , Harti Vahermets , Jaan Kers Effect of Different Hardwood Species and Lay-Up Schemes on the Mechanical Properties of Plywood. *Forests*, Volume: 11, Issue: 6, Pages: 649. Jun 6, (2020). <https://doi.org/10.3390/f11060649>.
3. Héloïse Dubois , Erkki Verkasalo , Hugues Claessens Potential of Birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for Forestry and Forest-Based Industry Sector within the Changing Climatic and Socio-Economic

Context of Western Europe, Forests, Volume: 11, Issue: 3, Pages: 336. Mar 17, (2020). <https://doi.org/10.3390/f11030336>.

4. Maximilian Pramreiter , Alexander Stadlmann , Christian Huber , Johannes Konnerth , Peter Halbauer , Georg Baumann , Ulrich Müller The Influence of Thickness on the Tensile Strength of Finnish Birch Veneers under Varying Load Angles/ Forests, Volume: 12, Issue: 1, Pages: 87. Jan 15, (2021). <https://doi.org/10.3390/f12010087>.

5. Wang, J., Cao, X. & Liu, H. A review of the long-term effects of humidity on the mechanical properties of wood and wood-based products. Eur. J. Wood Prod.79, 245–259 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01623-9>

6. Brycki, B.E. Organic Corrosion Inhibitors / B.E. Brycki, I.H. Kowalczyk, A. Szulc и др. // Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications. InTech, 2018. С. 65-81. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.72943>.

7. Gilbert, B.P. Structural behavior of hardwood veneer-based circular hollow sections of different compactness / B.P. Gilbert, I.D. Underhill, D. Fernando etc. // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 170. – P. 557-569. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.105>.

8. Hirschmüller, S. Long-term material properties of circular hollow laminated veneer lumber sections under water saturation and cement alkaline attack / S. Hirschmüller, J. Pravida, R. Marte, M. Flach // Wood Material Science & Engineering. – 2019. – Vol. 14. – № 3. – P. 142-156. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1434830>.

9. Hannes Orelma , Vesa Kunnari , Akio Yamamoto , Mikko Valkonen , Lauri Rautkari , Antti Korpela Improving mechanical performance and functionality of birch veneer with mechano-enzymatic microfibrillated cellulose coating. Cellulose, Volume: 30, Issue: 5, Pages: 3237-3254. Jan 30, (2023)/ <https://doi.org/10.1007/s10570-023-05059-1>

10. Miao Zou , Qiheng Tang , Wenjing Guo High-strength wood-based composites via laminated delignified wood veneers with different adhesive contents for structural applications. Polymer Composites, Volume: 43, Issue: 5, Pages: 2746-2758. Feb 26, (2022). <https://doi.org/10.1002/pc.26571>

11. Saara Hautamäki , Michael Altgen , Daniela Altgen , Erik Larnøy , Tuomas Hänninen , Lauri Rautkari The effect of diammonium phosphate and sodium silicate on the adhesion and fire properties of birch veneer. Holzforschung, Volume: 74, Issue: 4, Pages: 372-381. Sep 24, (2019). <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0059>

12. Anete Meija-Feldmane , Andris Morozovs , Uldis Spulle Chemical alterations of hardwood veneers due to thermal treatment. ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Volume: 1, Pages: 159. Jun 20, (2019) <https://doi.org/10.17770/etr2019vol1.4147>.

13. Pavlo Bekhta , Tomáš Pipiška , Vladimír Gryc , Ján Sedliačik , Pavel Král , Jozef Ráhel' , Jan Vaněrek Properties of Plywood Panels Composed of Thermally Densified and Non-Densified Alder and Birch Veneers. Forests, Volume: 14, Issue: 1, Pages: 96-96. Jan 4, (2023). <https://doi.org/10.3390/f14010096>.

14. Ruslan Khasanshin , Ruslan R Safin , Shamil Mukhametzyanov Experimental Studies of the Physical and Mechanical Properties of Glued Building Materials Based on Modified Veneer. Defect and Diffusion Forum, Volume: 410, Pages: 817-822. Aug 17, (2021). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.410.817>

15. Adam Słupecki , Anita Wronka The influence of densification time on the tensile strength and modulus of elasticity of birch veneers. Annals of WULS, Forestry and Wood Technology, Volume: 118, Pages: 48-54. Jul 25, (2022), <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.0488>.

16. Pavlo Bekhta , Ján Sedliačik , Nataliya Bekhta Effect of Veneer-Drying Temperature on Selected Properties and Formaldehyde Emission of Birch Plywood. Polymers. 2020; 12 (3): 593. <https://doi.org/10.3390/polym12030593>.

17. Ermochenkova M.G., Kladov M.YU. Teplovye efekty udaleniya svyazannoy vlagi iz drevesiny [Thermal effects of removing bound moisture from wood] Derevoobrabatvyayushchaya promyshlennost' [Woodworking industry] 2018. №1

18. Etuk, S.E., Agbasi, O.E. & Robert, U.W. Investigation of heat transfer and mechanical properties of Saccharum officinarum leaf board. Int J Energ Water Res 6, 95–102 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42108-021-00123-7>

19. Vasil'ev, V. V. Struktura drevesnogo syr'ya na zavodah drevesnostruzhechnyh plit raznoj moshchnosti [The structure of wood raw materials at chipboard plants of different capacities] // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2022. No. 238. P. 137-151. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.137-151> (in Russian).

20. Razinkov E.M., Ishchenko T.L., Trofimov S.P. (2022) Technological process of obtaining peeled veneer: the influence of external temperature conditions on the defrosting and warming up of wood. Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal], Vol. 12, No. 4 (48), pp. 141-152 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/10>.

21. Analiz silovogo vzaimodejstviya diskovogo nozha s drevesinoj pri besstruzhechnom delenii [Analysis of the force interaction of a disk knife with wood during chipless division] / V. P. Ivanovsky, D. K. Tomenko, S. P. Trofimov, A.V. Kiseleva. Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering journal], Vol. 12, No. 4 (48), pp. 130-140 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/9>.

Сведения об авторах

Разиньков Егор Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4057-4645>, e-mail: rasinkov50@mail.ru

Шамаев Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры древесиноведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1762-7956>, e-mail: drevstal@mail.ru

✉ *Кантиева Екатерина Валентиновна* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, ekantieva@mail.ru

Ищенко Татьяна Леонидовна – кандидат технических наук, доцент кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2118-2160>, e-mail: tl_ischenko@mail.ru.

Томина Елена Викторовна – доктор химических наук, доцент, заведующий кафедрой химии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5222-0756>, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru

Чуйков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, Республика Беларусь, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

Information about the authors

Egor M. Razinkov – Doctor of Engineering, professor of department of mechanical technology of wood, Voronezh State University of Forestry and Technologies name after G. F. Morozov", Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4057-4645>, e-mail: rasinkov50@mail.ru

Vladimir A. Shamaev – Doctor of Engineering, professor of department of wood science, Voronezh State University of Forestry and Technologies name after G. F. Morozov", Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1762-7956>, e-mail: drevstal@mail.ru

✉ *Ekaterina V. Kantieva* – Candidate of Technical Sciences, associate professor of department of mechanical technology of wood, Voronezh State University of Forestry and Technologies name after G. F. Morozov", Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, ekantieva@mail.ru

Tatiana L. Ishchenko – Candidate of Technical Sciences, associate professor of department of mechanical technology of wood, Voronezh State University of Forestry and Technologies name after G. F. Morozov", Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2118-2160>, e-mail: tl_ishchenko@mail.ru

Elena V. Tomina – Doctor of Chemical, associate professor of department of chemical, Voronezh State University of Forestry and Technologies name after G. F. Morozov", Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5222-0756>, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru

Alexey S. Chuikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarussian State Technological University, 13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

✉ – Для контактов | Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/16>

УДК 630*812.3



Исследование внутреннего трения натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth)

Александр В. Руссу¹, arussu@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-8525-0348>

Владимир А. Шамаев¹ drevstal@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Егор М. Разиньков¹, rasinkov50@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4057-4645>

Андрис Зимелис², andrisin@inbox.lv <https://orcid.org/0000-0001-6919-9263>

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

²Технический университет г. Рига, ул. Кинсала, 6а, Рига, LV-1048, Латвия

Предложен способ аппроксимации внутреннего трения древесины на основе принципа суперпозиции Больцмана, описывающего сложное вязкоупругое поведение системы линейной комбинацией компонентов. На подготовленные образцы натуральной и модифицированной древесины, выпиленные из стволовой части деревьев березы повислой (*Betula pendula* Roth), произраставших в Хлевенском Лесхозе (52.184130, 39.110463, НУМ 157м), воздействовали в радиальном и тангенциальном направлениях ультразвуком (частота 24.5 кГц, экспозиция 0-20 минут, шаг 5 минут) и импульсным магнитным полем (напряженность – 0.3 Тл, экспозиция 0-2 минуты, шаг 0.5 минуты). Далее исследовали внутреннее трение образцов на экспериментальной установке методом логарифмического декремента затухания на основе свободно-изгибных колебаний. Получены при уровне значимости $p=0.95$ абсолютные величины безразмерного коэффициента вязкости k , заложенного в модели, как основного структурного параметра для образцов натуральной и модифицированной древесины: для влажности от 4.3 до 15; для ультразвука 4.6 до 20; для импульсного магнитного поля от 3.6 до 7.7. Абсолютные величины безразмерных коэффициентов масштабирования μ для образцов из натуральной и модифицированной древесины принимают значение от 1.92 до 3.91. Наибольшая величина аппроксимации была достигнута при испытании образцов натуральной древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth): $R^2=0.98$ для радиального направления, влияние фактора влажности, и $R^2=0.85$ – для тангенциального, влияние фактора ультразвука, а также для образца из модифицированной древесины марки «Дестам» в радиальном направлении $R^2=0.96$, влияние фактора импульсного магнитного поля.

Ключевые слова: внутреннее трение древесины, натуральная и модифицированная древесина, береза повислая (*Betula pendula* Roth), принцип суперпозиции Больцмана, модифицирование, ультразвук, магнитное поле

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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



Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исследование внутреннего трения натуральной и модифицированной прессованием древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth) / А. В. Руссу, В. А. Шамаев, Е. М. Разиньков, А. Зимелис // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 236–256. – Библиогр.: с. 252–256 (31назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/16>.

Поступила 15.03.2023. Пересмотрена 14.04.2023. Принята 26.04.2023. Опубликована онлайн 15.05.2023.

Internal friction investigation of the natural and compressed birch (*Betula pendula* ROTH) wood

Alexander V. Russu¹, arussu@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0001-8525-0348>

Vladimir A. Shamaev¹ , drevstal@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1762-7956>

Egor M. Razinkov¹, rasinkov50@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-4057-4645>

Andris Ziemelis, andrisin@inbox.lv  <https://orcid.org/0000-0001-6919-9263>

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

²Technische Universitat Riga, Kipsalas iela, 6a, Centra rajons, LV-1048, Riga, Latvia

Abstract

A method is proposed for approximating of the internal friction of wood based on the Boltzmann superposition principle, which describes the complex viscoelastic behavior of the system by a linear combination of components. Prepared samples of natural and modified wood, sawn from the stem part of drooping birch (*Betula pendula* ROTH) trees growing in the Khlevensky Forestry (52.184130, 39.110463, ASL 157m), were exposed to radial and tangential directions with ultrasound (frequency 24.5 kHz, exposure 0 - 20 minutes, step 5 minutes) and pulsed magnetic field (strength - 0.3 T, exposure 0-2 minutes, step 0.5 minutes). Next, the internal friction of the samples was studied on an experimental setup using the logarithmic damping decrement based on free-bending vibrations. The absolute values of the dimensionless viscosity coefficient κ included in the model as the main structural parameter for samples of natural and modified wood were obtained at a significance level of $p=0.95$: for moisture content from 4.3 to 15; for ultrasound 4.6 to 20; for a pulsed magnetic field from 3.6 to 7.7. The absolute values of the dimensionless scaling factors μ for natural and modified wood samples range from 1.92 to 3.91. The highest approximation value was achieved when testing natural wood samples of silver birch (*Betula pendula* ROTH): $R^2=0.98$ for the radial direction, the influence of the humidity factor, and $R^2=0.85$ for the tangential direction, the influence of the ultrasonic factor, as well as for a sample of modified wood brand "Destam" in the radial direction $R^2=0.96$, the influence of the factor of the pulsed magnetic field.

Keywords: *internal friction of wood, natural and modified wood birch (Betula pendula ROTH), Boltzmann superposition principle, modification, ultrasound, magnetic field*

Funding: this research received no external funding.

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

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

For citation: Russu A.V., Shamaev V.A., Razinkov E.M., Ziemelis A. (2023) Internal friction investigation of the natural and compressed birch (*Betula pendula* Roth) wood. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 236-256 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/16>.

Received 15.03.2023 *Revised* 14.04.2023 *Accepted* 26.04.2023. *Published online* 15.05.2023.

Введение

Изучение древесины и поиск методов улучшения ее показателей представляет интерес с теоретической и прикладной точек зрения. Древесина,

прошедшая целенаправленную обработку физическими и химическими методами для изменения макро- и микроструктуры, называется модифицированной [1-2]. Стремясь повысить ценность древе-

сины для различных категорий потребителей, используют методы повышения ее прочности [3], обеспечения стабильности размеров [4-7] и предотвращения набухания [8-9]. За счет модифицирования древесины обеспечивают ее устойчивость к воздействию насекомых вредителей [10] и к гниению [11], повышают уровень ее огнестойкости [12], тем самым добиваясь увеличения срока службы изделий из древесины [13]. Модифицирование древесины [14-16] и улучшает ее текстуру [17-18]. Ряд практических задач послужил стимулом для применения модифицирования древесины с целью изменения вибрационных и акустических свойств древесины [19], изменения степени прозрачности материала [20], повышения проницаемости древесины для других веществ в газообразном состоянии [21]. Следует также отметить интенсификацию работы по изучению и разработке новых технологий модифицирования, направленных на повышение энергоэффективности [22] и ресурсосбережения при обработке древесины [23-25].

Физика древесины – обширный и быстро развивающийся раздел древесиноведения. Новые физико-химические методы позволяют проводить более глубокие исследования структуры натуральной и модифицированной древесины [26]. А применение искусственных нейронных сетей позволило спрогнозировать свойства модифицированной древесины и оптимизировать технологию ее получения [27], оценить степень ее водо- и влагопоглощения [28], моделирование волны напряжений в материале [29].

Величина внутреннего трения является обратной величине добротности. Добротность Q – важный параметр колебательных систем и материалов, она определяется отношением энергии, запасенной в колебательной системе к энергии, теряемой за период колебаний. Большая величина добротности материала имеет значение при изготовлении, например, музыкальных инструментов. Если принять величину рассеяния энергии за цикл колебаний $\Delta E/E$, то внутреннее трение можно определить следующим образом:

$$Q^{-1} = \frac{\Delta E}{2\pi E}, \quad (1)$$

где Q^{-1} – внутреннее трение (безразмерная величина), E – максимальная энергия в заданном объеме,

запасенная за один период, Дж; ΔE – рассеянная энергия в заданном объеме за один период, Дж.

В научной литературе закрепилось несколько равнозначных обозначений для внутреннего трения [30]:

$$Q^{-1} = \eta = \frac{\delta}{\pi}, \quad (2)$$

где Q^{-1} – внутреннее трение (безразмерная величина), η – вязкость, внутреннее трение (безразмерная величина), δ – логарифмический декремент затухания (безразмерная величина).

В научной литературе нет единой концепции, описывающей внутреннее трение. Одним из подходов является концепция, предложенная Больцманом. Больцман ввел правило, названное принципом суперпозиции, которое гласит, что «если к материалу в разное время последовательно приложен ряд напряжений, то каждое из них вносит такой вклад в деформацию, который не зависит от действия остальных напряжений» [30]. В основе принципа суперпозиции лежат два предположения:

отклик на любое событие линейный,

все последовательные события не зависят друг от друга.

Это означает, что материал реагирует на каждое последующее воздействие так, как будто не было никакого более раннего воздействия. Принцип суперпозиции является наиболее общей формулировкой требования линейности, которое входит в определение неупругости. Таким образом, по этому принципу результирующая деформация есть сумма деформаций, отвечающих каждой из ранее действовавших сил, с учетом уменьшения за истекшее время.

Цель работы – исследовать теоретическую и эмпирическую взаимосвязь эффектов влажности, ультразвука, импульсного магнитного поля с показателем внутреннего трения для натуральной и модифицированной древесины березы повислой (*Betula pendula* ROTN).

Материалы и методы

Работа является теоретико-эмпирическим исследованием.

Предмет и объект исследования

Объектом исследования явились образцы натуральной и модифицированной древесины бере-

зы повислой (*Betula pendula* ROTN). Для проведения эксперимента использовали образцы модифицированной древесины марки «Дестам» и образцы здоровой натуральной древесины, выпиленные из стволовой части деревьев березы повислой (*Betula pendula* ROTN), произраставших в в Хлевенском Лесхозе (52.184130, 39.110463, НУМ 157м).

При подготовке образцов натуральной и модифицированной древесины для проведения эксперимента осуществляли контроль качества. Не допускались образцы с трещинами, сучками, гнилью и другими дефектами. Для проведения эксперимента вырезали образцы следующих геометрических размеров: длина 500 мм (свободная длина 400 мм), ширина 42 мм, толщина 2,5 мм. Образцы предварительно взвешивали, и определяли их плотность. Минимальное количество образцов должно быть не менее 3 шт. Эксперимент проводили с образцами древесины влажностью 12%.

Предмет исследования – явление внутреннего трения натуральной и модифицированной древесины березы повислой (*B. pendula* ROTN) под влиянием влажности, ультразвука и импульсного магнитного поля.

Теоретические предпосылки

Для оценки внутреннего трения Q^{-1} в древесине образцов использован метод логарифмического декремента затухания на основе свободно-изгибных колебаний.

Как известно, величину логарифмического декремента колебаний и модуль упругости измеряют согласно ГОСТ 16483.31-74, меняя частоту вибраций образцов из древесины ω от 6 до 12 кГц с целью поиска резонансного значения.

К сожалению, систематических исследований зависимости внутреннего трения Q^{-1} от частоты ω нет, а имеющиеся в литературе сведения относительно $Q^{-1}(\omega)$ неполны, отрывочны, иногда противоречивы [30]. Кроме того, существует ограничение применения метода вынужденных колебаний, который можно применять до значений $Q^{-1} \leq 0,1$. Корректное определение внутреннего трения по ширине резонансного пика возможно только при малых уровнях деформаций. В этом случае необратимые потери невелики и колебательную систему можно считать линейной. По дан-

ной причине в работе за основу взято измерение двух последовательных амплитуд колебаний. При определении внутреннего трения методом свободно затухающих изгибных колебаний используют соотношение

$$Q^{-1} = \delta / \pi = \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{A_n}{A_{n+1}} \right), \quad (3)$$

где Q^{-1} – внутреннее трение,

δ – логарифмический декремент затухания,

A_n и A_{n+1} – амплитуды колебаний соседних периодов колебаний.

Представляет интерес рассмотрение изменения логарифмического декремента затухания для соседних амплитуд: A_1 к A_2 и A_2 к A_3 .

Величина внутреннего трения и логарифмический декремент затухания могут быть равноценно использованы для описания экспериментальных зависимостей, получаемых методом свободно-изгибных колебаний.

Величина логарифмического декремента затухания δ зависит от таких факторов, как направление действия напряжений относительно волокон (вдоль или поперек), породы древесины, микро- и макроструктуры, влажности, температуры.

Приложим принцип суперпозиции Больцмана к твердому телу. Пусть тело испытывало за время dt' , которое оканчивается к моменту t' , напряжение $\sigma(t')$, то к моменту $t > t'$ от действия этого напряжения останется деформация

$$d\varepsilon = \frac{\sigma(t')}{E} K(t-t') dt', \quad (5)$$

где $K(t-t')$ – функция наследственных свойств материала (функция памяти), безразмерная величина,

$d\varepsilon$ – изменение деформации,

$\sigma(t)$ – механическое напряжение,

E – модуль упругости,

t – время, с.

Напряжения могут меняться в любой момент времени. История деформации тела отсчитывают от начала $t_0 = -\infty$. Кроме того, если в процессе деформации меняется температура, то могут возникать сложные эффекты памяти.

Введем $\tau = t - t'$, в этом случае деформация с учетом принятых обозначений (5) имеет вид

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^{\infty} \sigma(t-\tau)K(\tau)d\tau, \quad (6)$$

где функция $K(\tau)$ представляет ядро уравнения (4).

Выражение (6) называют наследственным интегралом. Анализ этого выражения показывает, что все вклады напряжения независимы друг от друга, не влияют друг на друга, деформация пропорциональна напряжению (линейность суперпозиции); влияние изменений напряжения на деформацию ослабевает во времени тем сильнее, чем раньше было приложено напряжение к текущему времени.

Уравнение (6) дает математическую основу для расчета соотношений между напряжением и деформацией при различных способах и путях нагружения (деформирования). Но есть существенное ограничение - независимость констант, входящих в уравнение, от напряжения и деформации, то есть требование линейности реологического поведения.

С помощью принципа суперпозиции можно определить деформацию как функцию времени, если известны вся история напряжений и функция ползучести (запаздывающей деформации). В качестве характеристики неупругого поведения материала можно использовать любую функцию отклика (внутреннего трения, последействия, ползучести, релаксации напряжения) поскольку с помощью принципа суперпозиции можно вывести из нее любую другую функцию отклика. Это свойство связано с характеристикой материала: деформация ε зависит не только от мгновенного значения напряжения σ , но также от внутренних параметров, мгновенные значения которых отражают предысторию материала.

Для гармонических колебаний в этой модели имеем выражение внутреннего трения

$$Q^{-1} = \frac{\beta}{1 + \alpha}, \quad (7)$$

где $\alpha = \int_0^{\infty} K(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau$, безразмерная величина,

$$\beta = \int_0^{\infty} K(\tau) \sin(\omega\tau) d\tau, \text{ безразмерная величина,}$$

ω – частота колебаний, Гц.

Понятие внутреннего трения тесно связано с идеей течения вещества. Поэтому в данном исследовании предложено развить подход Больцмана на основе статистического метода описания физических систем, содержащих большое число электростатически взаимодействующих частиц, движущихся по законам классической механики, и использовать в интегральном уравнении ядро вида

$$K(\tau) = \frac{\kappa}{\tau^2 + b^2}, \quad (8)$$

где κ – параметр вязкости, учитывающий особенности строения материала, безразмерная величина,

b – параметр, характеризующий отклик структуры вещества на влияние внешнего поля, безразмерная величина.

Выбор вида ядра (8) имеет вполне понятный физический смысл, так как при системном переходе с макроуровня на микроуровень кинетическая энергия частиц превращается во внутреннюю энергию, которая есть величина аддитивная. Следовательно, параметр b есть функция, зависящая в общем случае от величины влияния макроскопических факторов физических полей: температуры T , влажности w , ультразвуковой u и магнитной обработки m :

$$b = b(T, w, u, m). \quad (9)$$

Таким образом, параметр b агрегирует в себе информацию о состоянии структуры материала в текущий момент времени, а уравнение Больцмана описывает эволюцию внутреннего трения материала в зависимости от изменения соответствующих факторов. Параметр b , являясь интегративным значением результата воздействия внешних физических полей на объект, может меняться в широких пределах, но для задачи исследования наибольший интерес представляет характерный интервал $[0,6;1]$.

Подставляя ядро (8) в выражение (7), получаем следующую зависимость:

$$Q^{-1}(\omega, \kappa, b) = \frac{\kappa \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau^2 + b^2} \sin(\omega\tau) d\tau}{1 + \kappa \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau^2 + b^2} \cos(\omega\tau) d\tau}. \quad (10)$$

Для практических расчетов уравнение (10) дополним безразмерным коэффициентом масштабирования μ , который определяется эксперимен-

тально и учитывает геометрические размеры и анизотропию исследуемого образца:

$$Q^{-1}(\omega, \kappa, b, \mu) = \mu \cdot \frac{\kappa \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau^2 + b^2} \sin(\omega\tau) d\tau}{1 + \kappa \int_0^{\infty} \frac{1}{\tau^2 + b^2} \cos(\omega\tau) d\tau} \quad (11)$$

Дизайн эксперимента

Образцы из натуральной и модифицированной древесины высушивались до влажности 12 %. Для уменьшения дефекта образования трещин образцы загружались в СВЧ-сушилку УСВЧ-2. Схема УСВЧ-2 приведена на рис.1.

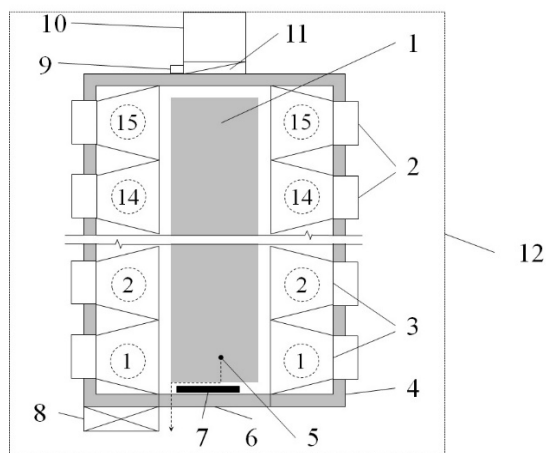


Рисунок 1. Схема установки УСВЧ-2 для сушки заготовок из древесины (вид сверху):

- 1 – высушиваемая заготовка, 2 - магнетроны,
- 3 - рупоры, 4 - теплоизолирующая камера,
- 5 - слив конденсата, 6 - заслонка,
- 7 –термоэлектрические нагреватели (ТЭНы),
- 8 - щит управления, 9 - датчики влажности и температуры, 10 - вытяжная вентиляция,
- 11 – вентилятор, 12 - защитное ограждение.

Figure 1. Scheme of the USVCH-2 (microwave installation) for drying bog oak (top view):

- 1 - dried lumber, 2 - magnetrons,
- 3 - horns, 4 - heat-insulating chamber,
- 5 - condensate drain, 6 - damper,
- 7 - thermoelectric heaters (heaters),
- 8 - control panel, 9 - humidity and temperature sensors,
- 10 - exhaust ventilation, 11 – fan, 12 - protective fence.

Источник: собственный рисунок авторов
Source: own drawing

Таблица 1
Характеристики СВЧ-сушилки УСВЧ-2

Table 1
Characteristics of the microwave dryer
USVCH-2

Параметр Parameter	Значение Value
Объемзагрузкидревесины Woodload ingvolume	2м ³ m ³
Количество магнетронов Numberofmagnetrons	30шт. PC
Напряжение Voltage	220В V
Суммарная мощность по СВЧ Total microwave power	30 кВт kW
Мощность вентилятора Fan power	0,2кВт kW
Мощность ТЭН heater	1,8 кВт kW
Габариты штабеля Stack dimensions	2x0,5x4м m
Частота СВЧ Microwave frequency	2,45ГГц GHz
Температура в камере Chamber temperature	80°С
Габариты установки Installation dimensions	3x2,8x6м m
Масса Weight	2200 кг kg
Температура эксплуатации Operating temperature	-20 – +50 °С

Источник: Шамаев, В. А. Модифицирование древесины: монография / В. А. Шамаев, Н. С. Никулина, И. Н. Медведев; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». Воронеж, 2022. 574 с.

Source: Shamaev V. A., Nikulina N. S., Medvedev I. N. (2022) Wood modification: monograph. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. VGLTU. Voronezh. 2022. 574 p. (In Russ.)

Между заготовками размещали прокладки толщиной 30 мм через 0,5 м. После загрузки включался СВЧ-нагрев, то есть 15 магнетронов с одной стороны, вентилятор, а в осенне-зимний период ТЭНы для поддержания в камере рабочей температуры в процессе сушки 80°С. Магнетроны работают поочередно по 30 мин сначала о одной стороны, затем с другой, затем общая пауза 15 мин. Во время паузы при выключенных магнетронах термопарой

измеряют температуру в камере. Сушилки снабжены приточно-вытяжной вентиляцией, обеспечивающей удаление испарившейся влаги из древесины в атмосферу. Контроль влажности воздуха в сушильной камере обеспечивался психрометром, древесины – влагомером Wagner, контроль температуры – термопарой с хромель-копелевой головкой.

Технические характеристики СВЧ-сушильной камеры представлены в табл. 1.

Образцы модифицированной древесины марки «Дестам» получали в лаборатории ВГЛТУ на полупромышленных установках в строгом соответствии с технологией, заявленной в патенте [31]. Технологический процесс представляет собой химико-механическое модифицирование древесины, в результате которого получают древесину марки «Дестам» (ГОСТ 24329-80).

Сырьем для получения модифицированной древесины марки «Дестам» является отобранный лесоматериал березы диаметром 190 мм и длиной 1 м, без гнили. После окорки получают чураки диаметром 180 мм. Затем чураки раскалывают пополам на гидроколуне и укладываются в контейнер. Контейнер кран-балкой перемещается в пропиточную ванну. Ванна заполнена раствором карбамида концентрацией 40%. После завершения процесса пропитки (40 часов) контейнер вынимается из ванн кран-балкой, устанавливаются на тележку, которую по рельсам закатывают в сушильно-прессовую камеру. Удельное давление на бруски древесины составляет 0,5-0,9 МПа. Температура сушки 100 °С начальная и 140 °С конечная достигается с помощью добавочных нагревателей спирального типа, установленных в боковых стенках камеры. В торцовой части камеры расположена емкость для сбора сконденсированной влаги, поскольку на начальном этапе сушки ее выделяется значительное количество.

В сушильно-прессовой камере параллельно с процессом сушки происходит ступенчатое деформирование древесины под давлением в течение 49 ч. Брус получается сечением 65×65×1000 мм, при начальных размерах 90×65×1000 мм. Затем он фрезеруется в размер 61×61 мм на четырехстороннем станке.

Некоторые механические свойства используемых в исследовании образцов древесины приведены в табл. 2.

Таблица 2
Некоторые механические свойства используемых
в исследовании образцов

Table 2
Mechanical properties types of wood, used this study

Материал образца Sample material	Плотность ρ , кг/м ³ Density, kg/m ³	Ударная вязкость, кДж/м ² Impact strength, kJ/m ²	
		12%	30%
Натуральная древесина березы повислой (<i>B. pendula</i> Roth) Birch	550	9,3	7,8
Модифицированная древесина марки «Дестам» Destam (birch modified)	800	10,2	9,2

Источник: Леонтьев Л. Л. Древесиноведение и лесное товароведение: учебник для вузов / Л. Л. Леонтьев. - 4-е изд., стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 416 с. - ISBN 978-5-507-44386-4. - Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/226460> (дата обращения: 01.12.2022).

Source: Leontiev L.L. Wood science and forest goods management: a textbook for universities. - 4th ed., erased. - St. Petersburg: Lan, 2022. - 416 p. - ISBN 978-5-507-44386-4. - Text: electronic. URL: <https://e.lanbook.com/book/226460> (01.12.2022).

Ультразвуковая обработка образцов древесины проводилась в ультразвуковой установке (Спецмаш, Россия), общий вид которой представлен на рис. 2.



Рисунок 2. Установка ультразвуковой обработки:
1 – Образец 2 – Ванна 3 – Ультразвуковой излучатель
Figure 2. Ultrasonic treatment unit: 1 – Sample 2 – Bath 3 – Ultrasonic emitter

Источник: собственная фотография авторов
Source: own photo

Технические характеристики ультразвуковой ванны приведены в табл. 3.

Таблица 3
Технические характеристики ультразвуковой ванны
Table 3
Specifications of ultrasonic cleaner

Наименование Name	Ед. измер. Unit meas.	Значение Meaning
Модель Model		УЗК 1,3 USK 1,3
Размеры рабочей емкости Working container dimensions	м m	0,12x0,11x0,1
Рабочий объем Working volume	м ³ m ³	1,3·10 ⁻³
Рабочая частота Operating frequency	кГц kHz	24,0 ± 7,5%

Наименование Name	Ед. измер. Unit meas.	Значение Meaning
Ультразвуковая мощность Ultrasonic power	Вт W	80
Напряжение питания Supply voltage	В V Гц Hz	220 50
Установка времени таймера Timer setting	с s	1-900 на энкоде on encoder
Температура жидкости Liquid temperature	С°	20-105
Панель управления Control panel		аналоговая analog
Корпус Housing		нержавеющая сталь stainless steel

Источник: ООО «Спецмаш», РФ
Source: LLC Spetsmash, RF

Для измерения длительности времени обработки применяли цифровой хронометр.

Обработка импульсным магнитным полем (ИМП) производилась на установке ГИМП-2 (ООО ГИМП, Россия), рис. 3.

Технические характеристики генератора импульсного магнитного поля (ГИМП-2) приведены в табл. 4.

Экспериментальная установка для создания свободно-затухающих колебаний приведена на рис. 4.

Температура и влажность рабочего помещения 22 °С и 68 %, что удовлетворяет требованиям для проведения эксперимента.

Таблица 4
Технические характеристики генератора импульсного магнитного поля
Table 4
Generator Specifications pulsed magnetic field

Наименование Name	Ед. изм. Unit meas.	Значение Meaning
Размер заготовок Workpiece size	м m	0,05x0,05x0,1
Количество заготовок Number of blanks	шт. PCS	1
Максимальная индукция магнитного поля Maximum magnetic field induction	Тл T	0,3

Наименование Name	Ед. изм. Unit meas.	Значение Meaning
Сила тока в импульсе Pulse current	кА kA	2
Число импульсов при обработке Number of pulses during processing		3000/6000
Частота подачи импульсов Pulse frequency	Гц Hz	100
Длительность импульса Pulse duration	10 ⁻⁶ с s	10
Форма импульса Pulse shape		треугольная triangular
Длительность обработки образцов Sample processing time	с s	30/60
Индуктивность соленоида Solenoid inductance	10 ⁻⁶ Гн. 10 ⁻⁶ H	5-10
Плотность намотки соленоида Solenoid winding density	витков/метр turns/meter	180
Напряжение однофазной питающей сети Single-phase mains voltage	В V	220
Потребляемая мощность генератором Power consumption of the generator	Вт W	1000
Габариты генератора Generator dimensions	м m	0,41x0,41x0,23
Масса генератора Generator weight	кг kg	15

Источник: ВГЛТУ, Лаборатория физико-механических измерений древесины, РФ

Source: VSUFT, Laboratory of Physical and Mechanical Measurements of Wood, RF

В установке образец закреплен консольно с помощью трехпозиционной зажимной оснастки на массивном основании. Изгиб происходит в горизонтальной плоскости. Для возбуждения и создания начального изгибного напряжения использован электромагнит (рис. 4, позиция 4). Отклик деревянного образца на магнитное поле обеспечен тонкой лентой (толщина 0,02мм) массой не более 0,6 г из сплава пермаллой (сплав 79НМ, ГОСТ 10994-74) с магнитно-мягкими свойствами и большой коэрцитивной силой. Лента прикреплена на небольшой участок свободного конца образца (рис. 4, позиция 6). Величина начального усилия для получения изгибных свободно-затухающих колебаний – 10-50

Н фиксируется магнитным полем электромагнита (рис. 4, позиция 4).

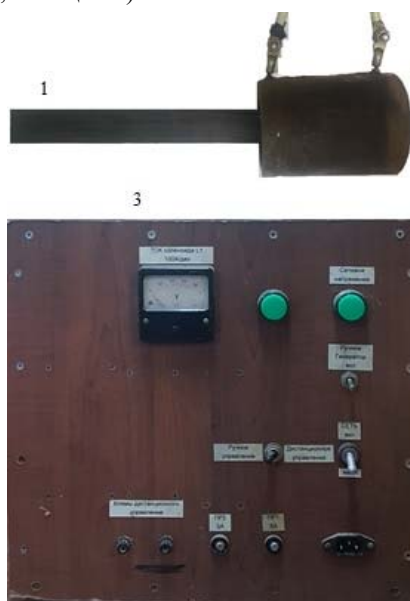


Рисунок 3. Установка импульсно-магнитной обработки: 1 – Образец 2 – Соленоид 3 – Панель управления

Figure 3. Installation of pulsed magnetic processing: 1 – Sample 2 – Solenoid 3 – Control panel

Источник: собственная фотография авторов
Source: own photo

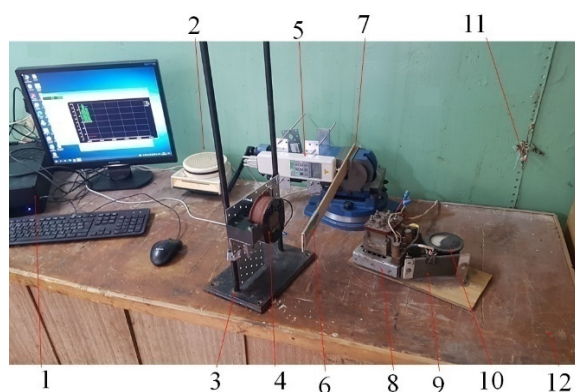


Рисунок 4. Установка для измерения амплитуды изгибных колебаний:

1 - персональный компьютер, 2 - стабилизатор напряжения, 3 - штатив, 4 - электромагнит, 5 - цифровой динамометр, 6 - образец древесины, 7 - трехпозиционная оснастка, 8 - трансформатор, 9 - реостат, 10 - амперметр, 11 - защитное заземление, 12 - рабочий стол.

Figure 4. Installation for measuring the amplitude of flexural vibrations:

1 - personal computer, 2 - voltage stabilizer, 3 - tripod, 4 - electromagnet, 5 - digital dynamometer, 6 - wood sample, 7 - three-position equipment, 8 - transformer, 9 - rheostat, 10 - ammeter, 11 - protective earth, 12 - working table.

12 - desktop.

Источник: собственная фотография автора
Source: own photo

Расстояние от точки закрепления до точки измерения 35 мм и может варьироваться от 0 до 100 мм. Все измерения амплитуды изгиба образца под действием внешней силы непосредственно оцифровываются динамометром и передаются на персональный компьютер, что существенно упрощает обработку результатов и не требуется дополнительная аналитическая работа по расшифровке осциллограмм.

В начале эксперимента проводились замеры следующих параметров: размеры образцов, их масса, влажность, температура. Параметры, измеряемые в ходе эксперимента, приведены в таблице 5.

Для измерения размеров образцов был использован штангенциркуль, отвечающий требованиям ГОСТ 166-89, с погрешностью измерения – 0,025 мм. Плотность образцов определялась по ГОСТ 21523.11-79, влажность определялась весовым методом ГОСТ 21523.5, образцы взвешивались на весах марки VIC-5100d1 с точностью до 0,1 г.

Образцы высушивали в бюксах до абсолютно сухого состояния согласно ГОСТ 16483.7-71. На дно эксикатора наливался насыщенный раствор соды ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Сухие образцы устанавливали так, чтобы они не касались друг друга и стенок эксикатора, закрывали крышкой и выдерживали при температуре 20 ± 2 °С.

Таблица 5

Параметры измерений в ходе эксперимента

Table 5

Measurement parameters during the experiment

Параметр Parameter	Шаг Step	Интервал Interval
Усилие изгиба Bending force	10Н N	0-50Н N
Влажность Humidity	10%	0-40%
Времядействияультразвука The duration of the ultrasound	5 мин m in	0-20 мин mi n
Времядействияимпульсногмагнитногополя The duration of the pulsed magnetic field	30с s	0-2 мин mi n

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Влагопоглощение и водопоглощение древесины определяли согласно ГОСТ 16483.19-72 и ГОСТ 16483.20 соответственно.



Рисунок 5. Внешний вид цифрового динамометра, измерителя амплитудных значений изгибных колебаний

Figure 5. Appearance of a digital dynamometer, the meter of amplitude values bending vibrations

Источник: собственная фотография автора
Source: own photo

Нагрев образцов осуществляли в сушильном шкафу со встроенным термометром. Рабочий интервал температур 20-100 °С. Температура внутри сушильного шкафа измеряется термометром, отвечающим требованиям ГОСТ 2823-73. Измерение температуры дублировалось цифровым термометром.

Величина амплитуды и частоты колебаний фиксировалась тензодатчиком цифрового динамометра марки МЕГЕОН 03050 (Китай), рис. 5. Технические характеристики цифрового динамометра приведены в табл. 6.

Таблица 6

Технические характеристики цифрового динамометра

Table 6

Specifications of digital dynamometer

Наименование Name	Ед. изм. Unit meas.	Значение Meaning
Марка Brand		Мегеон03050 Megeon 03050
Максимальное измеряемое значение силы Maximum measurable force value	Н N	50
Разрешение Permission	Н N	0,01
Точность Accuracy	%	$\pm 0,2$

Интерфейс Interface		RS232 разъем DB-9 для связи с ПК RS232 DB-9 connector for PC communication
Глубина памяти Memory depth		999
Адаптер питания Power adapter	В V Гц Hz	240 50 - 60
Условия эксплуатации Operating conditions		
Относительная влажность Relative Humidity	%	до 80
Температура Temperature	°C	5 - 105
Габаритные размеры прибора Overall dimensions of the device	м m	0,247 x 0,67 x 0,37
Масса прибора Device weight	кг kg	0,325

Источник: ООО «МЕГЕОН», Китай
Source: LLCMEGHEON, China

Таким образом, используемые в эксперименте методы испытаний, измерительные инструменты и приборы соответствуют государственным стандартам РФ, а максимальная относительная погрешность измерений не превышала 1 %.

Алгоритм эксперимента

Подготовленный образец натуральной древесины после обработки ультразвуком с экспликацией 5 мин (рис. 2) закрепляли в установку для измерения амплитуды изгибных колебаний (рис. 4) и получали величину амплитуды. Далее повторяли эксперимент для двух идентичных образцов. Затем на основании полученных данных амплитуд вычислялось среднее значение логарифмического декремента затухания δ .

Затем эту процедуру повторяли для подготовленных образцов модифицированной древесины марки «Дестам».

Далее процедуру измерений амплитуды и вычисления логарифмического декремента затухания δ для образцов натуральной древесины и модифицированной древесины марки «Дестам» проводили после обработки ультразвуком с экспликацией 10 мин, затем 15 мин, 20 мин.

На следующем этапе подготовленный образец натуральной древесины после обработки импульсным магнитным полем с экспликацией 0,5

мин (рис. 3) закрепляли в установку для измерения амплитуды изгибных колебаний (рис. 4) и получали величину амплитуды. Далее повторяли эксперимент для двух идентичных образцов и вычисляли δ . Затем эту процедуру повторяли для подготовленных образцов модифицированной древесины марки «Дестам».

Далее процедуру измерений амплитуды и вычисления δ для образцов натуральной древесины и модифицированной древесины марки «Дестам» проводили после их обработки импульсным магнитным полем с экспликацией 1 мин, затем 1,5 мин, 2 мин.

Для определения влияния влажности вначале образцы натуральной и модифицированной древесины выдерживали в воздухе, насыщенном влагой, при относительной влажности $\varphi=1$, затем высушивали при температуре 103 °C для достижения заданной влажности 20 и 10 % для проведения измерений. Для получения влажности 40 % образцы натуральной и модифицированной древесины вымачивали в воде до достижения заданной влажности.

Подготовленный образец натуральной древесины с влажностью 30 % закрепляли в установку для измерения амплитуды изгибных колебаний (рис. 4) и получали величину амплитуды. Далее повторяли эксперимент для двух идентичных образцов и вычисляли δ . Затем эту процедуру повторяли для подготовленных образцов модифицированной древесины марки «Дестам» влажностью 30 %. Затем всю процедуру повторяли для образцов с влажностью 20 %, 10 %, 40 % соответственно.

Анализ данных

Для определения достоверности аппроксимации используют коэффициент детерминации R^2 (R-SQUARED)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^b - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}, \quad (4)$$

где N – общее количество экспериментальных точек, y_i^b – теоретическое значение величины внутреннего трения, y_i – экспериментальное значение

величины внутреннего трения, \bar{y} – среднее арифметическое значение величины внутреннего трения.

Чем ближе значение R^2 к единице, тем лучше выбранная функция модели соответствует фактическим данным наблюдения. Все расчеты проведены в программе Excel 2003.

Результаты и обсуждение

Данные эксперимента и расчетов модели приведены на рисунках 6-11: влияние влажности рис. 6-7, влияние ультразвука рис. 8-9, влияние импульсного магнитного поля рис. 10-11. Расчеты коэффициентов сведены в таблицы 7 и 8. Для удобства маркировки символов принято обозначение r – радиальный, t – тангенциальный.

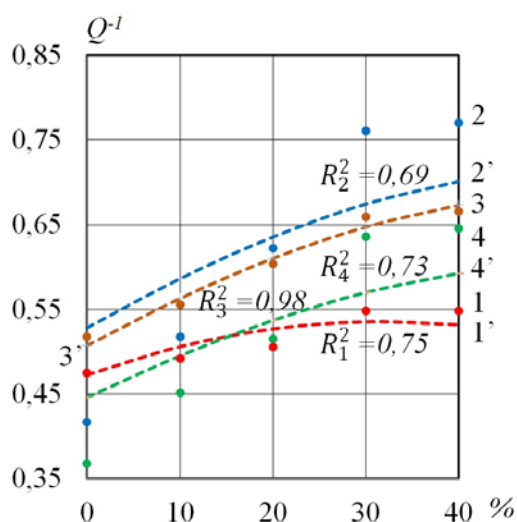


Рисунок 6. Влияние влажности на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и образцов из натуральной березы (A_1/A_2):

- 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент,
- 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент,
- 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент,
- 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент,
- 1' – аппроксимация образца марки «Дестам» радиальное направление,
- 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление,
- 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление,

4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление
Figure 6. Influence of humidity on the internal friction of the Destam wood sample and the natural birch sample (A_1/A_2):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
- 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
- 3 - sample natural birch radial direction experiment,
- 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
- 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,
- 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
- 4' – approximation of the sample natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

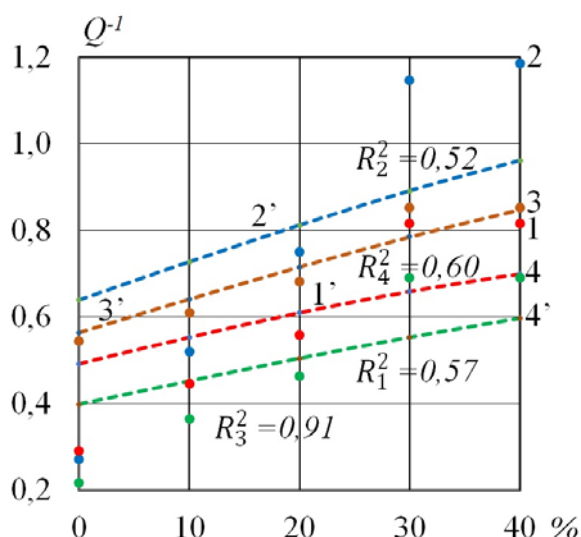


Рисунок 7. Влияние влажности на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и образцов натуральной березы (A_2/A_3):

- 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент,
- 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент,
- 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент,
- 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент,

- 1' – аппроксимация образца марки «Дестам» радиальное направление,
- 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление,
- 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление,
- 4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление

Figure 7. Influence of humidity on the internal friction of the Destam wood sample and the natural birch sample (A_2/A_3):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
 - 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
 - 3 - sample natural birch radial direction experiment,
 - 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
 - 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,
 - 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
 - 4' – approximation of the sample natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

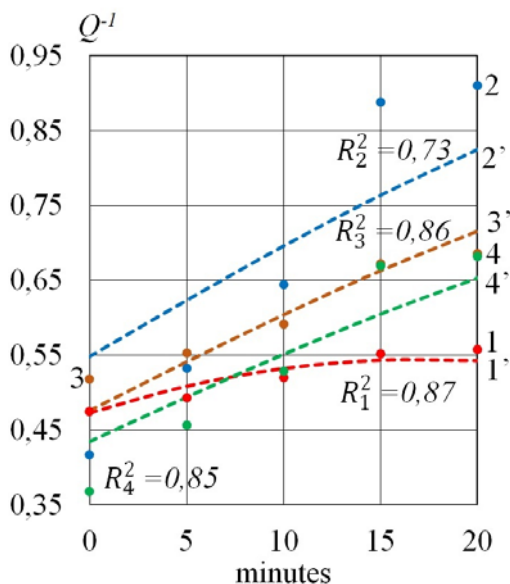


Рисунок 8. Влияние ультразвука на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и натуральной древесины березы (A_1/A_2):

- 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент,
 - 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент,
 - 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент,
 - 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент,
- 1' – аппроксимация образца марки «Дестам» радиальное направление,
 - 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление,
 - 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление,
 - 4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление

Figure 8. Influence of ultrasound on internal friction of the Destam wood sample and the natural birch sample (A_2/A_3):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
 - 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
 - 3 - sample natural birch radial direction experiment,
 - 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
 - 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,
 - 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
 - 4' – approximation of the sample natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

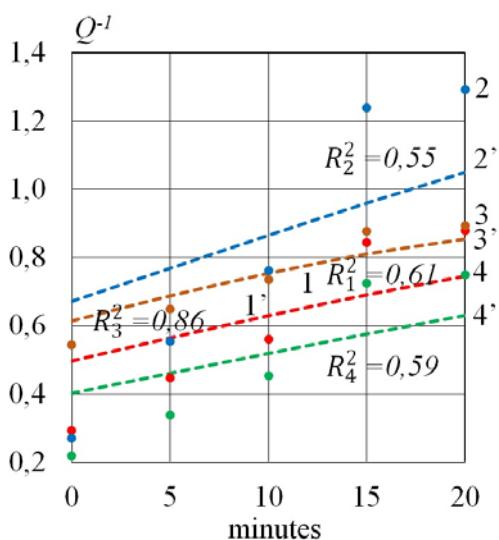


Рисунок 9. Влияние ультразвука на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и натуральной древесины березы (A_1/A_2):
 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент,
 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент,
 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент,
 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент,
 1' – аппроксимация образца марки «Дестам» радиальное направление,
 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление,
 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление,
 4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление

Figure 9. Influence of ultrasound on internal friction of the Destam wood sample and the natural birch sample (A_2/A_3):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
- 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
- 3 - sample natural birch radial direction experiment,
- 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
- 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,

- 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
- 4' - approximation of the sample natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора
 Source: own calculations

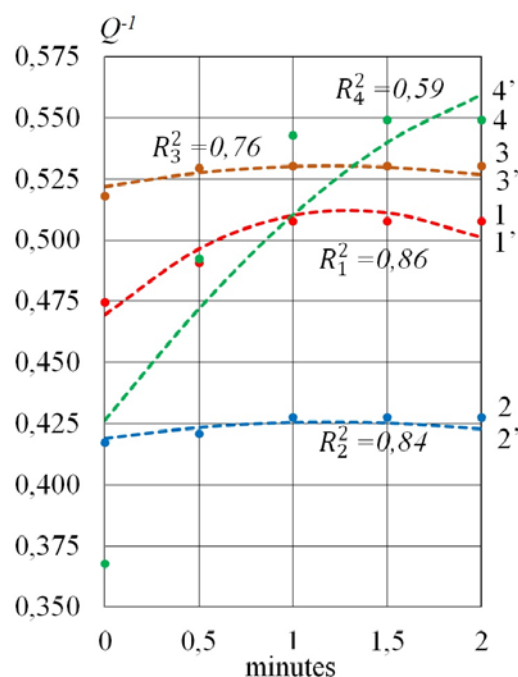


Рисунок 10. Влияние импульсного магнитного поля на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и образцов из натуральной березы (A_1/A_2):

- 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент,
- 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент,
- 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент,
- 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент,
- 1' – аппроксимация образца марки «Дестам» радиальное направление,
- 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление,
- 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление,
- 4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление

Figure 10. Influence of a pulsed magnetic field on the internal friction of a sample of wood "Destam" and a sample of natural birch (A_1/A_2):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
- 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
- 3 - sample natural birch radial direction experiment,
- 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
- 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,
- 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
- 4' - sample approximation natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

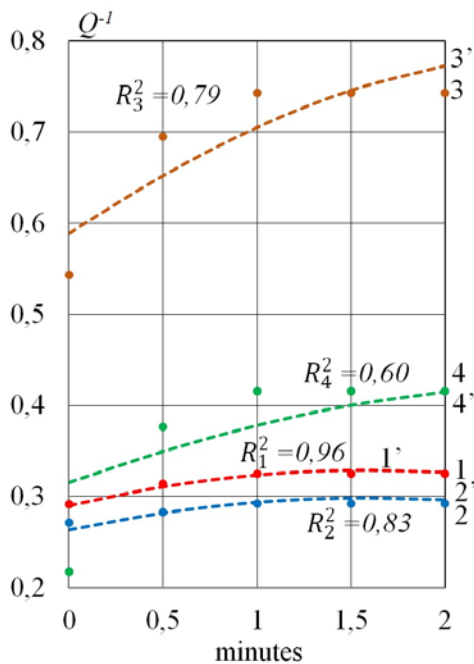


Рисунок 11. Влияние импульсного магнитного поля на внутреннее трение образцов из древесины марки «Дестам» и образцов из натуральной березы (A_2/A_3):

- 1 – образец марки «Дестам» радиальное направление эксперимент, 2 – образец марки «Дестам» тангенциальное направление эксперимент, 3 – образец натуральная береза радиальное направление эксперимент, 4 – образец натуральная береза тангенциальное направление эксперимент, 1' – аппроксима-

ция образца марки «Дестам» радиальное направление, 2' – аппроксимация образца марки «Дестам» тангенциальное направление, 3' – аппроксимация образца натуральная береза радиальное направление, 4' – аппроксимация образца натуральная береза тангенциальное направление

Figure 11. Influence of a pulsed magnetic field on the internal friction of a sample of wood "Destam" and a sample of natural birch (A_2/A_3):

- 1 - sample "Destam" radial direction experiment,
- 2 - sample "Destam" tangential direction experiment,
- 3 - sample natural birch radial direction experiment,
- 4 - sample natural birch tangential direction experiment,
- 1' - approximation of the sample "Destam" radial direction,
- 2' - approximation of the sample "Destam" tangential direction,
- 3' - approximation of the sample natural birch radial direction,
- 4' – sample approximation natural birch tangential direction

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

Таблица 7

Данные расчетов параметров модели для варианта A_1/A_2

Table 7

Model parameter calculation data for option A_1/A_2

Фактор factor	Параметр parameter	«Дестам» Destam		Береза birch	
		Рад rad	Тан tan	Рад rad	Тан tan
влажность humidity	κ	4,3	8	8	8
	μ	2,18	2,1	2,27	2,5
	R^2	0,75	0,6	0,98	0,7
ультразвук ultrasound	κ	4,6	15	15	15
	μ	2,21	2,2	2,58	2,8
	R^2	0,87	0,7	0,86	0,8
импульсное магнитное поле pulsed magnetic field	κ	3,6	4,3	4,3	7,6
	μ	2,1	2,7	2,2	2,6
	R^2	0,86	0,8	0,76	0,5

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

Наибольшее значение коэффициента детерминации R^2 можно наблюдать для случая определения влияния влажности на внутреннее трение образца из натуральной древесины березы радиального направления (A_1/A_2): $R^2=0,98$. Это высокий уровень аппроксимации эксперимента теоретической моделью на основе принципа суперпозиции Больцмана. В аналогичном случае для образцов марки «Дестам» $R^2=0,75$, то есть удовлетворительный уровень согласия. Таким образом, для образца из березы модель аппроксимирует более чем на 30% точнее.

Система «древесина-вода» достаточно сложная, и теории, которые могли бы с высокой степенью строгости описать это явление, пока не созданы. Чтобы не довольствоваться удовлетворительным уровнем согласия, учитывая, что механизм этого процесса еще не раскрыт, необходимо выйти за рамки макроскопической теории и, используя молекулярно-кинетические методы исследования структуры вещества микроскопического подхода, получить дополнительную информацию о механизмах влияния воды на модифицированную древесину. В том числе гипотеза о пленочном состоянии связанной воды в древесине должна получить убедительное подтверждение.

Для образцов натуральной древесины березы случая (A_1/A_2) для учета влияния факторов влажности и ультразвука наблюдается согласованное изменение модельного параметра вязкости для радиального (r) и тангенциального (t) направлений: влажность $\kappa_r = \kappa_t = 8$, ультразвук $\kappa_r = \kappa_t = 15$. Учет влияния импульсного магнитного поля в этом случае не дает такой согласованной картины: отличие в 1,77 раза. Характерно, что для образцов натуральной древесины березы случая (A_2/A_3) для влажности опять есть согласие $\kappa_r = \kappa_t = 15$, и близкие значения для импульсного магнитного поля $\kappa_r = 7,6, \kappa_t = 7,7$. А для ультразвука наоборот наблюдается отличие в 2 раза.

Таблица 8

Данные расчетов параметров модели для варианта A_2/A_3

Table 8

Model parameter calculation data for option A_2/A_3

Фактор factor	Параметр parameter	«Дестам» Destam		Береза birch	
		Рад rad	Тан tan	Рад rad	Тан tan
влаж-ность humidity	κ	11	15	15	15
	μ	2,43	1,92	2,18	3,09
	R^2	0,57	0,52	0,91	0,60
ультра-звук ultra-sound	κ	15	20	10	20
	μ	2,48	1,87	1,93	3,12
	R^2	0,61	0,55	0,86	0,59
Импульсное магнитное поле pulsed magnetic field	κ	4,3	4,3	7,6	7,7
	μ	3,55	3,91	1,94	3,63
	R^2	0,96	0,83	0,79	0,60

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

Для образца модифицированной древесины «Дестам» модельный параметр вязкости выражения (11) совпадает для радиального и тангенциального направлений только для случая (A_2/A_3) при воздействии импульсного магнитного поля $\kappa_r = \kappa_t = 4,3$. В остальных случаях отличия в модельном параметре вязкости изменяются в весьма широком интервале от 19% до 226%.

Наихудшее согласие аппроксимации на основе (11) с экспериментом обнаружено для случая (A_2/A_3) влияния влажности на образцы из «Дестам», тангенциальное направление: $R^2=0,52$. В целом, усредняя, можно заметить, что для случая (A_1/A_2) R^2 примерно на 15% выше, чем для (A_2/A_3). Таким образом, по мере затухания волн напряжения в материале большее влияние оказывает амплитудно независимая компонента внутреннего трения. Отличие между максимальным и минимальным значением R^2 и κ составляет соответственно $R_{\max}^2 / R_{\min}^2 \approx 1,88$ и $\kappa_{\max} / \kappa_{\min} \approx 5,56$.

Наибольшее значение коэффициента масштабирования μ получено при учете влияния импульсного магнитного поля на образец марки «Дестам» тангенциального направления для случая (A_2/A_3): $\mu=3,91$, что всего на 8% больше, чем у аналогичного образца натуральной древесины березы, но на 43% больше для той же серии образцов случая (A_1/A_2).

Наименьшее значение коэффициента масштабирования μ получено при учете влияния влажности также на образец марки «Дестам» тангенциального направления для случая (A_2/A_3): $\mu=1,92$, что на 38% меньше, чем у аналогичного образца натуральной березы, но всего на 12% меньше для той же серии образцов случая (A_1/A_2).

Близкие и совпадающие значения μ получены только для образца марки «Дестам» радиального направления случая (A_1/A_2) при учете влияния влажности ($\mu_r=\mu_t=2,18$) и ультразвукового поля ($\mu_r=2,21$, $\mu_t=2,24$). Отличие между максимальным и минимальным значением μ составляет соответственно $\mu_{\max} / \mu_{\min} \approx 2,04$.

Выводы

Модель внутреннего трения на основании принципа суперпозиции Больцмана позволила удовлетворительно аппроксимировать влияние влажности, ультразвукового поля и импульсного магнитного поля на величину внутреннего трения в образцах натуральной и модифицированной древесины. Наилучшее значение аппроксимации с экспериментом получено для образцов из натуральной березы: радиальное направление фактор влажности $R^2 = 0,98$, тангенциальное направление фактор ультразвукового поля $R^2 = 0,85$. Также высокий уровень аппроксимации выражения (11) с опытом показали данные испытаний образцов модифицированной древесины марки «Дестам» радиального направления $R^2 = 0,96$.

Для образцов из натуральной и модифицированной древесины получены коэффициенты масштабирования μ . Наибольшее значение ($\mu_r=3,91$) получено для образцов из древесины марки «Дестам» при воздействии импульсного магнитного поля в тангенциальном направлении. Наименьшее значение получено для образцов модифицированной древесины марки «Дестам» тангенциального направления при воздействии влажности: $\mu_t=1,92$.

Список литературы

1. Cai C., Zhou F. Sorption characteristic of thermally modified wood at varying relative humidity. *Forests*. 2022; 13(10):1687. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101687>
2. Ali M. R., Abdullah U. H. Hydrothermal modification of wood: A review. *Polymers*. 2021; 13(16): 2612. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162612>.
3. Romano A., Cappellin L. Exploring volatile organic compound emission from thermally modified wood by PTR-ToF-MS. *Analyst*. 2022; 147 (22): 5138-5148. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/D2AN01376B>
4. Wang Y., Zhang R. Improvement on dimensional stability and mold resistance of wood modified by tannin acid and tung oil. *Holzforschung*. 2022; 76 (10): 929-940. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0062>
5. Hu J. Manufacturing and characterization of modified wood with in situ polymerization and Cross-Linking of Water-Soluble Monomers on Wood Cell Walls. *Polymers*. 2022; 14(16):3299. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14163299>
6. Bytner O., Laskowska A. Evaluation of the dimensional stability of black poplar wood modified thermally in nitrogen atmosphere. *Materials*. 2021; 14(6): 1491. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14061491>
7. Shukla S. R. Evaluation of dimensional stability, surface roughness, colour, flexural properties and decay resistance of thermally modified *Acacia auriculiformis*. *MaderasCiencia y Tecnologia*. 2019; 21(4): 433-446. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000401>
8. Youming D., Silong G. The effect mechanism and properties of poplar wood cross-linking modified with polyols and polycarboxylic acid. *Wood Material Science & Engineering*. 2023; 1(18): 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2023.2167110>

9. Mohebbi B., Broushakian V. Moisture induced stresses in cross laminated timber (CLT) made from hydrothermally modified wood. *Eur.J.WoodProd.* 2022; 80: 1087–1094. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01836-0>
10. Thais M.B., Glaucileide F. Resistance to biodeterioration of thermally modified *Eucalyptus grandis* and *Tectonagrandis* short-rotation wood. *Wood Material Science & Engineering.* 2022; 11 (26): 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2022.2150985>
11. Plaza N.Z., Pingali S.V., Ibach R.E. Nanostructural changes correlated to decay resistance of chemically modified wood fibers. *Fibers.* 2022; 10(5):40. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib10050040>
12. Kurkowiak K., Wu M., Emmerich L. Fire-retardant properties of wood modified with sorbitol, citric acid and a phosphorous-based system. *Holzforschung.* 2023; 77(1): 38-44. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0114>
13. Sikora A., Hajkova K., Jurczykova T. Degradation of chemical components of thermally modified *robiniapseudoacacia* L. wood and Its effect on the change in mechanical properties. *International Journal of Molecular Sciences.* 2022; 23(24):15652. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms232415652>
14. Nisrina P.H., Resa M., Istie S.R. Surface characterization and paint bonding quality on chemically and thermally modified short rotation teak wood. *International Wood Products Journal.* 2022; 11 (8): 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/20426445.2022.2138908>
15. Cambazoglu M., Tomak E.D., Ermeydan M.A. Natural weathering of spruce wood chemically modified by reused-caprolactone solution. *Coloration Technology.* 2022; 10 (4): 17-28. DOI: <https://doi.org/10.1111/cote.12645>
16. Miklecic J., Loncaric A., Veselicic N., Jirous-Rajkovic V. Influence of wood surface preparation on roughness, wettability and coating adhesion of unmodified and thermally modified wood. *Drvna industrija.* 2022; 73 (3): 261-269. DOI: <https://doi.org/10.5552/drvind.2022.0016>
17. Juncheng L., Wei W., Haolin W. Prediction of thermal modified wood color change after artificial weathering based on IPSO-SVM model. *Research Square.* 2022; 11: 1-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2327397/v1>
18. Kymalainen M., Domeny J., Rautkari L. Moisture sorption of wood surfaces modified by one-sided carbonization as an alternative to traditional facade coatings. *Coatings.* 2022; 12(9):1273. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12091273>
19. Buchelt B., Kruger R., Wagenfuhr, A. The vibrational properties of native and thermally modified wood in dependence on its moisture content. *Eur. J. Wood Prod.* (2023); 1(13): 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01919-y>
20. Chen X., Ge-Zhang S., Han Y. Ultraviolet-assisted modified delignified wood with high transparency. *Applied Sciences.* 2022; 12(15):7406. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12157406>
21. Liu Y., Avramidis S. Air permeability of thermally modified hemlock wood. *Les/Wood.* 2022; 71(2): 25–30. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2022.v71n02a01>
22. Tomov G. Reduction of Electricity Consumption in the Production of Thermally Modified Wood. 2022 22nd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria. 2022; 1:1-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SIELA54794.2022.9845726>
23. Bonfatti Junior E.A., Lengowski E.C., Nisgoski S. Properties of thermally modified woods by a Brazilian process. *Environmental Sciences Proceedings.* 2022; 22(1):24. DOI: <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13042>
24. Aytin A., Cakicier, N. Weathering's effect on color and roughness in some heat-treated wood species with modified water-based varnish. *BioResources.* (2022); 17(4): 6358-6376. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.17.4.6358-6376>
25. Roberts G., Campbell S., Graham A. The environmental and social impacts of modified wood production: effect of timber sourcing. *International Wood Products Journal.* 2022; 13(4): 236-254. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/20426445.2022.2117923>

26. Mamonova M., Ciglian D., Reinprecht L. SEM analysis of glued joints of thermally modified wood bonded with PUR and PVAc. *Glues Materials*. 2022; 15(18):6440. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15186440>
27. Chen Y., Wang W., Li N. Prediction of the equilibrium moisture content and specific gravity of thermally modified wood via an Aquila optimization algorithm back-propagation neural network model. *BioResources*. 2022; 17(3): 4816-4836. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.17.3.4816-4836> DOI: 10.15376/biores.17.3.4816-4836
28. Haftkhani A.R., Abdoli F., Rashidijouybari I. Prediction of water absorption and swelling of thermally modified fir wood by artificial neural network models. *Eur. J. Wood Prod.* 2022; 80: 1135–1150. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01839-x>
29. Nasir V., Nourian S., Avramidis S., Cool J. Stress wave evaluation for predicting the properties of thermally modified wood using neuro-fuzzy and neural network modeling. *Holzforschung*. 2019; 73(9), 827-838. DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/hf-2018-0289>
30. Golovin, I. S., Cordero, F. Internal Friction and Mechanical Spectroscopy (IFMS-19). Concluding Remarks. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023; 946, 169375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169375>.
31. Патент № 2712521 С1 Российская Федерация, МПК В27К 5/06. Способ получения модифицированной древесины : № 2019103517 : заявл. 07.02.2019 :опубл. 29.01.2020 / В. А. Шамаев, И. Н. Медведев, Д. А. Паринов, О. Ф. Шишлов ; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Модификация" – 8 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42449800>

References

1. Cai C., Zhou F. Sorption characteristic of thermally modified wood at varying relative humidity. *Forests*. 2022; 13(10): 1687. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13101687>
2. Ali M. R., Abdullah U. H. Hydrothermal modification of wood: A review. *Polymers*. 2021; 13(16): 2612. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/polym13162612>.
3. Romano A., Cappellin L. Exploring volatile organic compound emission from thermally modified wood by PTR-ToF-MS. *Analyst*. 2022; 147 (22): 5138-5148. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/D2AN01376B>
4. Wang Y., Zhang R. Improvement on dimensional stability and mold resistance of wood modified by tannin acid and tung oil. *Holzforschung*. 2022; 76 (10): 929-940. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0062>
5. Hu J. Manufacturing and characterization of modified wood with in situ polymerization and Cross-Linking of Water-Soluble Monomers on Wood Cell Walls. *Polymers*. 2022; 14(16): 3299. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14163299>
6. Bytner O., Laskowska A. Evaluation of the dimensional stability of black poplar wood modified thermally in nitrogen atmosphere. *Materials*. 2021; 14(6): 1491. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma14061491>
7. Shukla S. R. Evaluation of dimensional stability, surface roughness, colour, flexural properties and decay resistance of thermally modified *Acacia auriculiformis*. *MaderasCiencia y Tecnologia*. 2019; 21(4): 433-446. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000401>
8. Youming D., Silong G. The effect mechanism and properties of poplar wood cross-linking modified with polyols and polycarboxylic acid. *Wood Material Science & Engineering*. 2023; 1(18): 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2023.2167110>
9. Mohebbi B., Broushakian V. Moisture induced stresses in cross laminated timber (CLT) made from hydrothermally modified wood. *Eur.J.WoodProd.* 2022; 80: 1087–1094. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01836-0>
10. Thais M.B., Glaucileide F. Resistance to biodeterioration of thermally modified *Eucalyptus grandis* and *Tectonagrandis* short-rotation wood. *Wood Material Science & Engineering*. 2022; 11 (26): 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2022.2150985>
11. Plaza N.Z., Pingali S.V., Ibach R.E. Nanostructural changes correlated to decay resistance of chemically modified wood fibers. *Fibers*. 2022; 10 (5): 40. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib10050040>

12. Kurkowiak K., Wu M., Emmerich L. Fire-retardant properties of wood modified with sorbitol, citric acid and a phosphorous-based system. *Holzforschung*. 2023; 77(1): 38-44. DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2022-0114>
13. Sikora A., Hajkova K., Jurczykova T. Degradation of chemical components of thermally modified robiniapseudoacacia L. wood and its effect on the change in mechanical properties. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(24):15652. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms232415652>
14. Nisrina P.H., Resa M., Istie S.R. Surface characterization and paint bonding quality on chemically and thermally modified short rotation teak wood. *International Wood Products Journal*. 2022; 11 (8): 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/20426445.2022.2138908>
15. Cambazoglu M., Tomak E.D., Ermeydan M.A. Natural weathering of spruce wood chemically modified by reused-caprolactone solution. *Coloration Technology*. 2022; 10 (4): 17-28. DOI: <https://doi.org/10.1111/cote.12645>
16. Miklečić J., Lončarić A., Veselić N., Jirous-Rajković V. Influence of wood surface preparation on roughness, wettability and coating adhesion of unmodified and thermally modified wood. *Drvna industrija*. 2022; 73 (3): 261-269. DOI: <https://doi.org/10.5552/drind.2022.0016>
17. Juncheng L., Wei W., Haolin W. Prediction of thermal modified wood color change after artificial weathering based on IPSO-SVM model. *Research Square*. 2022; 11: 1-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-2327397/v1>
18. Kymäläinen M., Domeny J., Rautkari L. Moisture sorption of wood surfaces modified by one-sided carbonization as an alternative to traditional facade coatings. *Coatings*. 2022; 12 (9): 1273. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12091273>
19. Buchelt B., Kruger R., Wagenfuhr, A. The vibrational properties of native and thermally modified wood in dependence on its moisture content. *Eur. J. Wood Prod.* (2023); 1(13): 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01919-y>
20. Chen X., Ge-Zhang S., Han Y. Ultraviolet-assisted modified delignified wood with high transparency. *Applied Sciences*. 2022; 12(15): 7406. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12157406>
21. Liu Y., Avramidis S. Air permeability of thermally modified hemlock wood. *Les/Wood*. 2022; 71(2): 25–30. DOI: <https://doi.org/10.26614/les-wood.2022.v71n02a01>
22. Tomov G. Reduction of Electricity Consumption in the Production of Thermally Modified Wood. 2022 22nd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria. 2022; 1:1-6. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SIELA54794.2022.9845726>
23. Bonfatti Junior E.A., Lengowski E.C., Nisgoski S. Properties of thermally modified woods by a Brazilian process. *Environmental Sciences Proceedings*. 2022; 22(1): 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13042>
24. Aytin A., Cakicier, N. Weathering's effect on color and roughness in some heat-treated wood species with modified water-based varnish. *BioResources*. (2022); 17(4): 6358-6376. DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.17.4.6358-6376>
25. Roberts G., Campbell S., Graham A. The environmental and social impacts of modified wood production: effect of timber sourcing. *International Wood Products Journal*. 2022; 13(4): 236-254. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/20426445.2022.2117923>
26. Mamonova M., Ciglian D., Reinprecht L. SEM analysis of glued joints of thermally modified wood bonded with PUR and PVAc. *Glues Materials*. 2022; 15(18): 6440. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15186440>
27. Chen Y., Wang W., Li N. Prediction of the equilibrium moisture content and specific gravity of thermally modified wood via an Aquila optimization algorithm back-propagation neural network model. *BioResources*. 2022; 17(3): 4816-4836. DOI: 10.15376/biores.17.3.4816-4836 DOI: <http://dx.doi.org/10.15376/biores.17.3.4816-4836>
28. Hafikhani A.R., Abdoli F., Rashidijouybari I. Prediction of water absorption and swelling of thermally modified fir wood by artificial neural network models. *Eur. J. Wood Prod.* 2022; 80: 1135–1150. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01839-x>

29. Nasir V., Nourian S., Avramidis S., Cool J. Stress wave evaluation for predicting the properties of thermally modified wood using neuro-fuzzy and neural network modeling. *Holzforschung*. 2019; 73(9), 827-838. DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/hf-2018-0289>

30. Golovin I. S., Cordero, F. Internal Friction and Mechanical Spectroscopy (IFMS-19). Concluding Remarks. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023; 946, 169375. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169375>.

31. Patent No. 2712521 C1 Russian Federation, IPC B27K 5/06. Method for obtaining modified wood: No. 2019103517: Appl. 02/07/2019 : publ. January 29, 2020 / V. A. Shamaev, I. N. Medvedev, D. A. Parinov, O. F. Shishlov; applicant and patent holder Limited Liability Company "Modification" - 8 p.

Сведения об авторах

Руссу Александр Викторович – аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8525-0348>, e-mail: arussu@mail.ru.

✉ *Шамаев Владимир Александрович* – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1762-7956>, e-mail: drevstal@mail.ru

Разиньков Егор Михайлович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4057-4645>, e-mail: rasinkov50@mail.ru

Зимелис Андрис – доктор технических наук, Технический университет г. Рига, ул. Кипсала, 6а, Рига, Латвия, LV-1048, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6919-9263>, e-mail: andrisin@inbox.lv.

Information about the authors

Alexander V. Russu – postgraduate, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8525-0348>, e-mail: arussu@mail.ru.

✉ *Vladimir A. Shamaev* – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1762-7956>, e-mail: drevstal@mail.ru.

Egor M. Razinkov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4057-4645>, e-mail: rasinkov50@mail.ru.

Ziemelis Andris – Doctor of Technical Sciences, Technische Universitat Riga, Kipsalasiela 6a, Centrarajons, Riga, Latvia, LV-1048, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6919-9263>, e-mail: andrisin@inbox.lv.

✉ – Для контактов / Corresponding author


Article

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/17>

UDC 630 (631.445.4 + 504.53)



Influence of forest belts on the total content of Pb and Cd and their exchange compounds in leached chernozems


Elena N. Tikhonova¹ ✉, tichonova-9@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>

Nadezhda S. Gorbunova², vilian@list.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7986-8106>

Anastasia A. Safonova¹, anastasi.safonova18@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-0488-1963>

Ella I. Treschevskaya¹, ehl1t@yandex.ru  <http://orcid.org/0000-0003-1454-4095>

Ye Jiaolong³, yj1051766@163.com  <https://orcid.org/0009-0009-1555-1597>

Yuan Hong³, yhyda@qq.com  <https://orcid.org/0009-0007-8003-7215>

Ma Chanhua³, mchchengdu@163.com  <https://orcid.org/0009-0004-0025-9829>

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

²Voronezh State University, Universitetskaya square, 1, Voronezh, 394018, Russian Federation

³Sichuan institute of nuclear geology, No.35, Huayang Chang Shun Road, No. 328, Chengdu City, Shuangliu County, Sichuan Province, 610052, China

Abstract

The creation of artificial forest belts is an effective method of land reclamation. Forest belts have a positive impact on prevention of erosion processes, formation of heat and moisture regimes, reduction of turbulent exchange in the surface air layer and reduction of carbon dioxide share in the atmosphere. An important feature of forest plantations is the prevention of soil contamination with heavy metals (HM). It occurs due to profile redistribution of HM and partial remediation of soils. The obtained data confirm this position. Reliable transformation of leached chernozems under the influence of different-age forest belts in comparison with arable soils on the territory of All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar named after A.L. Mazlumov was revealed. Forest vegetation type contributes to more sustainable ecosystems due to stabilization of humus content and its uniform distribution throughout the soil profile. Correlation analysis revealed a close relationship between content of humus, soil solution pH and the gross content, as well as the exchangeable compounds of HM. An increase in the concentration of HM in the upper layer of arable chernozem was revealed; it was caused by active emissions of exhaust gases from agricultural machinery and the application of mineral fertilizers. The design of forest belts in order to restore contaminated soils is planned in the territory of Sichuan Province (southwest China). This project needs additional research, which is planned to be carried out in the future.

Keywords: *heavy metals, lead, cadmium, gross content, exchange compounds, forest belts of different ages, arable land, leached chernozems*

Funding: this research was financially supported by the Science and Technology Key Research Support Foundation of Sichuan Province [grant no. 2021JDGD0014, and 2022YFH0037].

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: Tikhonova E.N., Gorbunova N.S., Safonova A.A., Treschevskaya E.I., Jiaolong Y., Hong Y., Chanhua M. (2023). Influence of forest belts on the total content of Pb and Cd and their exchange compounds in leached chernozems // *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 257-267. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/17>.

Received 30.11.2023. *Revised* 20.04.2023. *Accepted* 22.04.2023. *Published online* 15.05.2023.

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/17>

УДК 630 (631.445.4 + 504.53)



Влияние лесополос на валовое содержание Pb и Cd и их обменные соединения в черноземах выщелоченных

Елена Н. Тихонова¹✉, e-mail: tichonova-9@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>

Надежда С. Горбунова², e-mail: vilian@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7986-8106>

Анастасия А. Сафонова³, e-mail: anastasi.safonova18@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0488-1963>

Элла И.Трещевская⁴ e-mail: ehl1t@yandex.ru <http://orcid.org/0000-0003-1454-4095>

Е Цзяолун⁵, e-mail: yjl051766@163.com <https://orcid.org/0009-0009-1555-1597>

Юань Хун⁵, e-mail: yhyuda@qq.com <https://orcid.org/0009-0007-8003-7215>

Ма Чаньхуа⁵, e-mail: mchchengdu@163.com <https://orcid.org/0009-0004-0025-9829>

^{1, 3,4}ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Россия

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

⁵Сычуаньский институт ядерной геологии, No. 35, ул. Хуаян Чан Шунь, No. 328, г. Чэнду, округ Шуанлю, пров. Сычуань, 610052, КНР, Китай

Создание искусственных лесополос является эффективным методом мелиорации земель. Лесополосы положительно влияют на предотвращение эрозионных процессов, формирование тепловлажностного режима, снижение турбулентного обмена в приземном слое воздуха и снижение доли углекислого газа в атмосфере. Важной особенностью лесных насаждений является предотвращение загрязнения почвы тяжелыми металлами (ТМ). Это происходит за счет профильного перераспределения ТМ и частичной ремедиации почв. Полученные данные подтверждают это положение. Выявлена достоверная трансформация выщелоченных черноземов под влиянием разновозрастных лесополос по сравнению с пахотными почвами на территории ВНИИ сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова. Лесной тип растительности способствует более устойчивым экосистемам за счет стабилизации содержания гумуса и его равномерного распределения по почвенному профилю. Корреляционный анализ выявил тесную связь между содержанием гумуса, рН почвенного раствора и валовым содержанием, а также обменными соединениями ТМ. Выявлено увеличение концентрации ТМ в верхнем слое пахотного чернозема; это было вызвано активными выбросами выхлопных газов сельскохозяйственной техники и внесением минеральных удобрений. На территории провинции Сычуань (юго-запад Китая) планируется проектирование лесополос с целью восстановления загрязненных почв. Этот проект нуждается в дополнительных исследованиях, которые планируется провести в ближайшем будущем.

Ключевые слова: *тяжелые металлы, свинец, кадмий, валовое содержание, обменные соединения, разновозрастные лесополосы, пашня, выщелоченные черноземы*

Финансирование: исследование было проведено при финансовой поддержке Фонда поддержки научных и технологических исследований провинции Сычуань [грант №. 2021JDGD0014 и 2022YFH0037]

Благодарности: Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам за их вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Влияние лесополос на валовое содержание Pb и Cd и их обменные соединения в черноземах выщелоченных / Е. Н. Тихонова, Н. С. Горбунова, А. А. Сафонова, Э. И. Трещевская, Е. Цзяолун, Ю. Хун, М. Чаньхуа // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 257–267. – Библиогр.: с. 264–266 (23 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/17>.

Поступила 30.11.2022. Пересмотрена 20.04.2023. Принята 22.04.2023. Опубликовано онлайн 15.05.2023.

Introduction

Lead (Pb) and cadmium (Cd) in the biosphere are in a dispersed state, and also have a high degree of toxicity, which makes these HMs one of the most active pollutants in the noosphere and allows them to be classified as hazard class 1 [11, 19]. The fact of the possibility of migration of the studied HMs into various shells of our planet and active transfer along trophic chains has been experimentally proven [16]. Therefore, the creation of protective forest belts is often used to protect soils from Pb and Cd pollution [14].

The multifactorial ameliorative impact of forest belts is reliably known, scientifically substantiated for the first time by V.V. Dokuchaev. Subsequent scientific works actively studied the influence of forest phytocenoses on various properties of the soil cover [17]. Forest biogeogenesis is characterized by an increase in the intensity and productivity of the biological cycle [7, 18, 21]. This position contributed to the continuation of more in-depth scientific research, which revealed the fact of the formation of the most favorable conditions for the occurrence of active processes of humus accumulation, namely: the continuous supply of organic matter in the form of plant litter and dead roots [10, 20, 21]. An undeniable fact is the improvement in the water balance, due to the longer retention of moisture after precipitation, the intensive accumulation of snow cover and its longer melting. There is a pattern of strengthening of these processes with the age of forest plantations [14]. Scientific works reflect the positive

effect of forest vegetation on the structure of microbial communities and their biomass [10]. The ability of forest belts to counteract the development of water erosion and deflation [9, 12], which has a positive effect on crop yields [3], has been established. One cannot deny the fundamental importance of green spaces in the deposition of CO₂ [5, 13, 16].

However, the issue of the influence of forest belts of different ages on the content of HMs in soils is not so widely discussed in the scientific literature. Therefore, the purpose of this work was to study the effect of forest belts of different ages on the total content and profile distribution of exchangeable forms of Pb and Cd compounds in leached chernozems.

These studies are of particular value for various projects for the restoration of soils contaminated with HMs. In the future, it is planned to establish a similar experience in the territory of Sichuan Province (southwest China).

Materials and methods

The studies were carried out on the territory of All-Russian Scientific Research Institute of Sugar Beet and Sugar them. A.L. Mazlumov (Ramonsky district of the Voronezh region). Leached medium-thick, low-humus, heavy loamy arable lands were studied (the coordinates of the section and a photograph of the section are shown in Figure 1), as well as leached medium-thick, medium-humus, heavy loamy chernozems under forest belts 50 years old (Fig. 2) and ninety years old (Fig. 3).

Full-profile sections were laid down to the depth of occurrence of parent rocks, which in this region are cover carbonate loams. Sampling for general chemical and physicochemical analyzes was carried out every 10 cm. In soil samples, the pH of the aqueous suspension was determined by the potentiometric method using an I-160MI microprocessor ionometer (Aquilon, Moscow, Russia). The gross humus content was determined according to I.V. Tyurin [8].



Figure 1. Leached medium-thick low-humus heavy loamy chernozem on mantle carbonate loams (arable land, coordinates: 51°931'094"; 9°293'506")

Source: authors' own calculations

Soil samples for analysis were weighed on an HR-100ARG electronic analytical balance. Laboratory glassware and chemical reagents for analyzes were used by Vekton (St. Petersburg, Russia). To analyze the total content and exchange compounds of Pb and Cd, mixed samples of 20 cm each were taken in the main genetic horizons (0–20; 60–80; 100–120 cm).

When conducting research on the ecological and agrochemical state of soils, it is customary to investigate mobile HM compounds. This is due to their high degree of sensitivity to changes in landscape geochemical conditions, as well as the ability to reflect the degree of availability of these chemical elements for plants [6, 22]. Therefore, mobile HM compounds were determined in the extract from ammonium acetate buffer (pH = 4.8) in the ratio of soil solution 1:10. Without data on the total content of HMs in the studied chernozems, which serve to determine both the total soil contamination and the degree of pollutant mobility [11, 15, 23]. The total content of Pb and Cd was deter-

mined as follows: soil calcined in a muffle was treated with HNO₃ (1:1) and H₂O₂ (concentrated), reagents from Vekton (St. Petersburg, Russia) and boiled. Then, the heavy metals under study were determined in the filtrate on a TA-4 voltammetric analyzer (TA-Lab, Tomsk, Russia) by stripping voltammetry.



Figure 2. Leached medium-thick medium-humus heavy loamy chernozem on mantle carbonate loams (forest belt 50 years, coordinates: 51°327'113"; 33°267'551")

Source: authors' own calculations



Figure 3. Leached medium-thick medium-humus heavy loamy chernozem on mantle carbonate loams (forest belt 90 years, coordinates: 51°930'474"; 39°292'921")

Source: authors' own calculations

Statistical processing of the obtained analytical results was performed in Microsoft Excel and STATISTICA 13.3. The standard error of the mean was used as a characteristic of the reliability of the results obtained and was calculated as the ratio of the standard deviation of a random variable to the sample size, which in our case is equal to 7.

To mathematically prove the dependence of heavy metal sorption by organic matter and express its intensity, we used the r-Pearson correlation coefficient, which is a measure of a straight-line relationship between variables, at $n = 7$.

Results and discussion

The investigated chernozems leached as a result of plowing are subjected to enhanced mineralization of organic matter. In this case, there is a removal with a crop of nutrients that are not fully replenished by the application of organic and mineral fertilizers. As a result, the humus content in the upper horizon of arable soils is $5.7 \pm 0.10\%$. Chernozems, leached arable lands degrade to low humus. The distribution of organic matter along the profile of arable soils is characterized by a uniform accumulative type up to 40 cm, a regressive accumulative type from 40 to 80 cm, and a uniformly accumulative type of accumulation from 80 cm and deeper.

Chernozems leached under forest belts have a significantly higher humus content, which is $7.2 \pm 0.09\%$ for a 50-year-old forest belt, $7.8 \pm 0.13\%$ for a 90-year-old forest belt, soils are diagnosed as medium humus. The preservation of organic matter at a sufficiently high level, and to some extent its increase, is explained by the stable accumulation of plant residues on the soil surface in the form of tree litter. Then there is an intensive enrichment of the soil with minerals, proteins and carbohydrates. The profile distribution of humus up to a depth of 40 cm has a regressive-accumulative type, at a depth of 40 to 60 cm it has a progressive-accumulative type, and deeper than 60 cm it has a uniformly accumulative type of distribution.

Root secretions of woody vegetation of forest belts have an acidifying effect on the reaction of the soil solution medium. So, in the leached chernozems of arable land pH_{aq} is 6.8 ± 0.11 units, the reaction of the environment is characterized as neutral, and under the litter of woody vegetation it becomes slightly acidic

and amounts to 6.0 ± 0.15 units. In addition, under woody vegetation there is an accumulation and retention of moisture, which penetrates into deeper soil layers. Due to this, exchangeable hydrogen of hydrolytic acidity penetrates into the deeper layers. All this leads to intensive leaching of carbonates in chernozems leached under forest belts. In the soil-forming rock, an alkaline reaction of the soil solution is noted ($pH=8.3 \pm 0.15$ units). The alkalinity of the soil solution is largely determined by the carbonate content of the parent rock.

Previous studies indicate that the total content of HMs and their mobile compounds are closely related to organic matter, the reaction of soil solution, and the sorption capacity of silt particles [2, 4, 16]. According to the data obtained, the accumulation of the total content of Pb (Fig. 4) and Cd (Fig. 5) is noted in the upper layer of the studied leached chernozems. Metals form strong organomineral chelate compounds with organic matter.

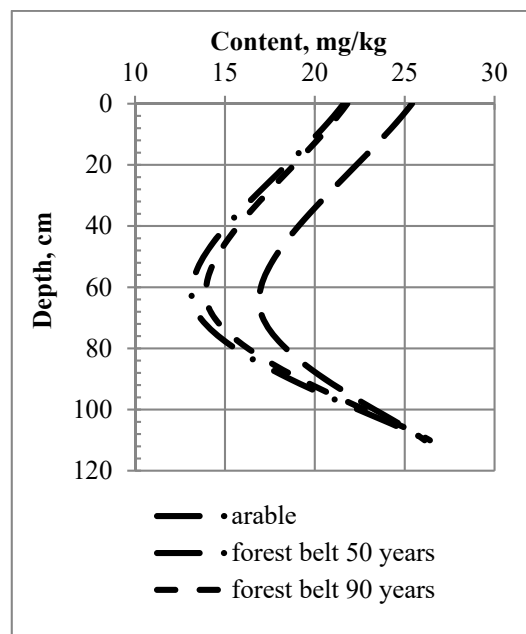


Figure 4. Distribution of the total content of Pb in the profile of leached chernozems

Source: authors' own calculations

It should be noted that in the soils of arable land, a significant accumulation of the total content of Pb and Cd is noted relative to the chernozems of the forest belts. Thus, the amount of Pb is 24.5 ± 1.05 mg/kg, Cd is 0.42 ± 0.13 mg/kg, while in the same 0-20 cm layer, the total content under a 50-year-old for-

est belt does not exceed 21.6 and 0.35 mg/kg, 90-year-old forest belt - 21.8 and 0.37 mg/kg, respectively.

The studied metals are able to enter the surface of arable chernozems as a result of the combustion of fuel from agricultural machines, as well as as impurities of mineral fertilizers, especially phosphorus ones. Despite the noted trend, pollution of the study area does not occur, since the data obtained do not exceed the MPC accepted for soils of the chernozem series, which are 30 mg/kg for Pb and 1 mg/kg for Cd [1].

Down the soil profile of all the studied soils, a fairly uniform decrease in the total content of HMs is noted (Fig. 1, 2), following a decrease in the amount of organic matter. The results of the correlation analysis indicate a close relationship between the profile distribution of humus and the studied HMs (Table 1).

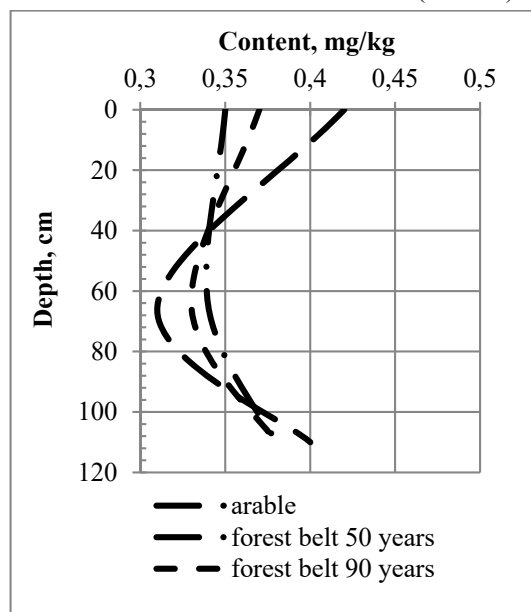


Figure 5. Distribution of the total content of Cd in the profile of leached chernozems
Source: authors' own calculations

The second peak of Pb and Cd accumulation is observed in the lower part of the soil profile, which is caused by the alkaline reaction of the soil solution and the abundance of the clay fraction, which has a high sorption capacity for HMs [2, 4, 16].

HM exchange compounds are mobile; they are able to migrate radially and laterally and enter adjacent media. Therefore, their content makes it possible to judge the ecological situation and the influence of elements on plant and living organisms [15]. The content of Pb exchangeable compounds in the upper 0-20 cm layer is 1.17 ± 0.04 mg/kg, down the profile there is an increase in its amount to 1.24 ± 0.01 mg/kg. The distribution curve has a regressive-eluvial type (Fig. 6).

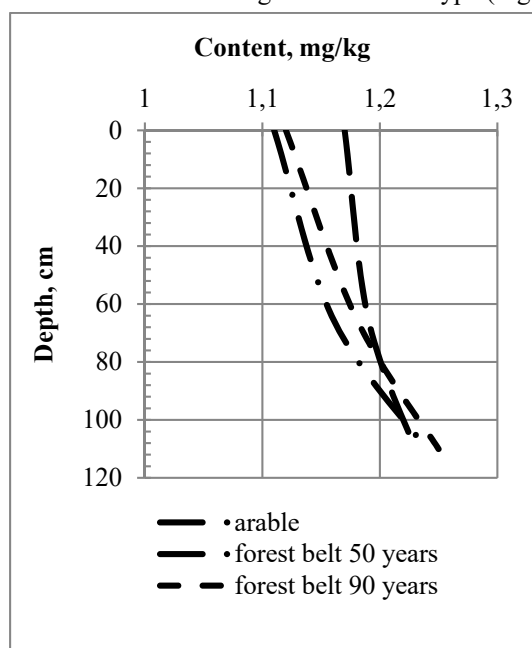


Figure 6. Distribution of exchangeable Pb compounds in the profile of leached chernozems
Source: authors' own calculations

Table 2
Correlation coefficients between the total content, exchangeable forms of Pb and Cd compounds, humus and pH_{aq} in the profile of leached chernozems under various lands

Field	Pb – humus	Pb – pH	Cd – humus	Cd – pH
Gross content				
arable	0,79	-0,71	0,80	-0,72
forest belt 50 years	0,85	-0,74	0,89	-0,74
forest belt 90 years	0,89	-0,68	0,92	-0,69
Exchange connections				
arable	-0,81	0,87	0,82	-0,73
forest belt 50 years	-0,86	0,91	0,75	-0,68
forest belt 90 years	-0,91	0,94	0,76	-0,67

Source: own calculations

There is a high negative correlation dependence between the profile distribution of exchange compounds Pb and humus, as well as a high positive dependence in the distribution of the element and pH (Table 1).

The content of Cd exchange compounds varies within narrow limits (0.03-0.05 mg/kg). The profile distribution of the element is characterized by a regressive-accumulative type in the upper part and a regressive-eluvial type in the lower part (Fig. 7).

The obtained data on the content of HM exchange compounds do not exceed the MPC used for soils of the chernozem series [1], which indicates the absence of contamination of the studied soils. Pb is characterized by a low percentage of mobility (5-9%), which indicates a low migration ability of the element and its movement into adjacent environments. The mobility coefficient Cd is higher, it ranges from 8 to 24%. This phenomenon characterizes the element as more mobile, capable of migrating to adjacent environments.

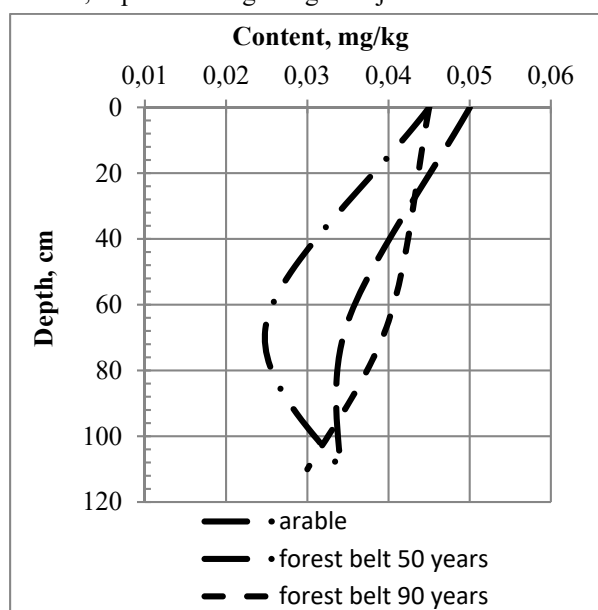


Figure 7. Distribution of Cd exchange compounds in the profile of leached chernozems
Source: authors' own calculations

Conclusion

Ecosystems of forest belts are primarily the result of anthropogenic activities, but compared to the agroecosystem, they are more resilient and stable. So, as a result of intensive plowing, increased mineralization of organic matter is noted, leading to a decrease in

the percentage of humus. Leached chernozems degrade to low humus. Forest belts, on the contrary, stabilize the processes of formation and decay of organic matter, leading to a fairly stable content of humus, its fairly uniform distribution over the soil profile, and a higher percentage in the upper horizons.

Under the woody vegetation of forest belts, unique soil and climatic conditions are formed, characterized by high moisture accumulation and its long-term retention in the soil profile. This phenomenon contributes not only to a more uniform profile distribution of organic matter, but also to the reaction of the soil solution. Root secretions containing carbonic, malic, citric acids provide acidification of the soil solution. They cause the replacement of exchangeable calcium and magnesium cations with exchangeable hydrogen in the soil absorbing complex.

The noted features of soil transformation under arable land and forest belts of different ages also affect the behavior of the studied HMs. The total content of Pb and Cd in chernozems leached under various types of land is characterized by the accumulation of elements in the upper layer of the humus horizon (in which the formation of strong chelated organomineral compounds is noted) and at the depth of the parent rock, which is enriched in the clay fraction, which has an increased sorption capacity for heavy metals. Exchange compounds Pb have a regressive-eluvial type of profile distribution. The distribution of Cd exchange compounds is more complex, combining regressive accumulative and regressive eluvial types.

There is a significant increase in both the total content of HMs and their exchangeable compounds in the upper layer of arable soils. The phenomenon is explained by the intake of elements as impurities introduced with mineral fertilizers and additional components obtained as a result of the combustion of agricultural machinery fuel. Despite this, no excess of MPC was detected. Although, attention is drawn to the increase in the degree of mobility of the studied HMs in leached arable chernozems.

In order to stabilize and improve the ecological state of soils in Sichuan Province, it is planned to create forest belts in this region. This project needs additional detailed geochemical studies, which will be reflected in future publications.

Список литературы

1. Горбунова Н. С., Громовик А. И., Черепухина И. В., Владимиров Д. Р., Федотов С. В., Цзяолун Е., Хунмэй Ч., Хун Ю., Чаньхуа Ма. Сорбционная способность органического вещества к тяжелым металлам и ее применение при восстановлении загрязненных почв. *АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал*. 2022;6(54). Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.51419/202126620>. :
2. Горбунова Н. С., Громовик А. И., Черепухина И. В., Терентьева Ю. Ю. Сорбционные процессы в почвах. Вопросы изучения и современное состояние проблемы. *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2021;21(2):265-275. Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3360>.
3. Клименко О. Е., Клименко Н. И. Изменение свойств агрочерноземов сегрегационных Крыма под влиянием различных лесонасаждений. *Почвоведение*. 2021;5:606-619. Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050129>.
4. Крамарева Т. Н., Горбунова Н. С., Куликова Е. В. Миграционные особенности тяжелых металлов в лесных ландшафтах. *Лесотехнический журнал*. 2021;11.4(44):68-78. Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6>
5. Мамонов Д. Н., Морковина С. С., Матвеев С. М., Шешнищан С. С. Сравнительная оценка методов учёта депонирования углерода сосново-берёзовыми лесными насаждениями Воронежской области. *Лесотехнический журнал*. 2022;12.3(47):4-15. Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/1>.
6. Плеханова И. О., Золотарева О. А. Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами. *Агрохимия*. 2020;10:79-88. Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120100099>.
7. Русакова И. В. Сравнительная оценка влияния традиционной и биологизированной систем земледелия на агрохимические, биологические свойства и биологическое качество органического вещества серой лесной почвы Владимирского ополья. *Агрохимия*. 2021;12:15-22. Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121120127>.
8. Щеглов Д. И., Громовик А. И., Горбунова Н. С. Основы химического анализа почв. 2019:332. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/wiyzef>.
9. Chendev Y. G., Gennadiev A. N., Smirnova M. A. et al. Early Stages of the Evolution of Chernozems under Forest Vegetation (Belgorod Oblast). *Eurasian Soil Sc.* 2022;55:387-403. Режим доступа: <https://doi.org/10.1134/S1064229322040068>.
10. Chernov T. I., Zhelezova A. D. The Dynamics of Soil Microbial Communities on Different Timescales. *Eurasian Soil Science*. 2020;5:643-652. Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422932005004X>.
11. Chernova O. V., Bezuglova O. S. Use of background concentrations of heavy metals for regional monitoring of soil contamination by the example of Rostov oblast. *Eurasian Soil Sci.* 2019;52(8):1007. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319080040>.
12. Ebabu K., Tsunekawa A., Tsubo M. Global Analysis of cover management and support practice factors that control soil erosion and conservation. *International Soil and Water Conservation Research*. 2022;10.2:161-176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.12.002>.
13. Kalinitchenko V. P., Glinushkin A. P., Swidsinski A. V., Minkina T. M., Andreev A. G., Mandzhieva S. S., Sushkova S. N., Makarenkov D. A., Ilyina L. P., Chernenko V. V., Zamulina I. V., Larin G. S., Zavalin A. A., Gudkov S. V. Thermodynamic mathematical model of the kastanozem complex and new principles of sustainable semiarid protective silviculture management. *Environmental Research*. 2021;194:110605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110605>.
14. Mikhin V. I., Taniykevich V. V., Mikhina E. A. Growth and ameliorative role of protective plantation in conditions of forest-steppe zone IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. *International Forestry Forum "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions"*. 2020;595:012045. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012045>.
15. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>.

16. Mitra S., Chakraborty A. J., Tareq A. M., Emran T. B., Nainu E., Khusro A., Abubakr M. I., Khandaker M. U., Osman H., Alhumaydhi F. A., Simal-Gandara J. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity *Journal of King Saud University – Science*. 2022;101865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>.
17. 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. Режим доступа: DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.4787>.
18. Olson K. R., Gennadiev A. N. Dynamics of soil organic carbon storage and erosion due to land use change (Illinois, USA) *Eurasian Soil Sci.* 2020;53(4):436. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229320040122>.
19. Plekhanova I. O., Zolotareva O. A., Tarasenko I. D., Yakovlev A. S. Assessment of ecotoxicity of soils contaminated by heavy metals. *Eurasian Soil Sci.* 2019;52(10):1274. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319100089>.
20. Rajput V. D., Minkina T. M., Kumari A., Shende S. S., Ranjan A., Barakhov A. V., Rajput P., Sushkova S. N., Faizan M., Singh A., Khabirov I., Gromovik A., Gorbunova N., Nazarenko O., Kızılkaya R. A review on nanobioremediation approaches for restoration of contaminated soil. *Eurasian Journal of Soil Science*. 2022;11(1):12020. DOI: <https://doi.org/10.18393/EJSS.990605>.
21. Tang Y., Shao Q., Shi T. et al. Spatiotemporal dynamics of forest ecosystem carbon budget in Guizhou: customisation and application of the CBM-CFS3 model for China. *Carbon Balance Manage.* 2022;17:10. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00210-0>.
22. 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: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104570>.
23. Bryndina, L. Restoration of soil microbiological activity after herbicide stress / L. Bryndina, I. Svistova, O. Baklanova. *Forestry Engineering Journal*. 2022; 12 (46):43-55. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/4>.

References

1. Gorbunova N. S., Gromovik A. I., Cherepuhina I. V., Vladimirov D. R., Fedotov S. V., Czjaolun E., Hunmjej Ch., Hun Ju., Chan'hua Ma. Sorbcionnaja sposobnost' organicheskogo veshhestva k tjazhelym metallam i ee primenenie pri vosstanovlenii zagryaznennyh pochv. *AgroJekoInfo: Jelektronnyj nauchno-proizvodstvennyj zhurnal*. 2022;6(54). (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51419/202126620>.
2. Gorbunova N. S., Gromovik A. I., Cherepuhina I. V., Terent'eva Ju. Ju. Sorbcionnye processy v pochvah. *Voprosy izucheniya i sovremennoe sostojanie problemy. Sorbcionnye i hromatograficheskie processy*. 2021;21(2):265-275. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3360>.
3. Klimenko O.E., Klimenko N.I. Izmenenie svojstv agrochernozemov segregacionnyh Kryma pod vlijaniem razlichnyh lesonasazhdenij. *Pochvovedenie*. 2021;5:606-619. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X21050129>.
4. Kramareva T. N., Gorbunova N. S., Kulikova E. V. Migracionnye osobennosti tjazhelyh metallov v lesnyh landshaftah. *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2021;11.4(44):68-78. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/6>.
5. Mamonov D. N., Morkovina S. S., Matveev S. M., Sheshnican S. S. Sravnitel'naja ocenka metodov uchjota deponirovaniya ugleroda sosnovo-berjozovymi lesnymi nasazhdenijami Voronezhskoj oblasti. *Lesotekhnicheskij zhurnal*. 2022; 12.3(47):4–15. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.3/1>.
6. Plehanova I. O., Zolotareva O. A. Jekologicheskoe normirovanie sostojanija pochv, zagryaznennyh tjazhelymi metallami. *Agrohimiya*. 2020;10:79-88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120100099>.
7. Rusakova I. V. Sravnitel'naja ocenka vlijanija tradicionnoj i biologizirovannoj sistem zemledelija na agrohimicheskie, biologicheskie svojstva i biologicheskoe kachestvo organicheskogo veshhestva seroj lesnoj pochvy Vladimirskogo opol'ja. *Agrohimiya*. 2021;12:15-22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121120127>.
8. SHCHeglov D. I., Gromovik A. I., Gorbunova N. S. Osnovy himicheskogo analiza. 2019:332. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/wiyzef>

9. Chendev Y. G., Gennadiev A. N., Smirnova M. A. et al. Early Stages of the Evolution of Chernozems under Forest Vegetation (Belgorod Oblast). *Eurasian Soil Sc.* 2022;55:387–403. URL: <https://doi.org/10.1134/S1064229322040068>.
10. Chernov T. I., Zhelezova A. D. The Dynamics of Soil Microbial Communities on Different Timescales. *Eurasian Soil Science.* 2020;5:643-652. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106422932005004X>.
11. Chernova O. V., Bezuglova O. S. Use of background concentrations of heavy metals for regional monitoring of soil contamination by the example of Rostov oblast. *Eurasian Soil Sci.* 2019;52(8):1007. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319080040>.
12. Ebabu K., Tsunekawa A., Tsubo M. Global Analysis of cover management and support practice factors that control soil erosion and conservation. *International Soil and Water Conservation Research.* 2022;10.2:161-176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.12.002>.
13. Kalinitchenko V. P., Glinushkin A. P., Swidsinski A. V., Minkina T. M., Andreev A. G., Mandzhieva S. S., Sushkova S. N., Makarenkov D. A., Ilyina L. P., Chernenko V. V., Zamulina I. V., Larin G. S., Zavalin A. A., Gudkov S. V. Thermodynamic mathematical model of the kastanozem complex and new principles of sustainable semiarid protective silviculture management. *Environmental Research.* 2021;194:110605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110605>.
14. Mikhin V. I., Taniykevich V. V., Mikhina E. A. Growth and ameliorative role of protective plantation in conditions of forest-steppe zone IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. *International Forestry Forum "Forest ecosystems as global resource of the biosphere: calls, threats, solutions".* 2020;595:012045. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012045>.
15. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>.
16. Mitra S., Chakraborty A. J., Tareq A. M., Emran T. B., Nainu E., Khusro A., Abubakr M. I., Khandaker M. U., Osman H., Alhumaydhi F. A., Simal-Gandara J. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity *Journal of King Saud University – Science.* 2022;101865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>.
17. 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. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.4787>.
18. Olson K. R., Gennadiev A. N. Dynamics of soil organic carbon storage and erosion due to land use change (Illinois, USA) *Eurasian Soil Sci.* 2020;53(4):436. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229320040122>.
19. Plekhanova I. O., Zolotareva O. A., Tarasenko I. D., Yakovlev A. S. Assessment of ecotoxicity of soils contaminated by heavy metals. *Eurasian Soil Sci.* 2019;52(10):1274. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319100089>.
20. Rajput V. D., Minkina T. M., Kumari A., Shende S. S., Ranjan A., Barakhov A. V., Rajput P., Sushkova S. N., Faizan M., Singh A., Khabirov I., Gromovik A., Gorbunova N., Nazarenko O., Kızılkaya R. A review on nanobioremediation approaches for restoration of contaminated soil. *Eurasian Journal of Soil Science.* 2022;11(1):12020. DOI: <https://doi.org/10.18393/EJSS.990605>.
21. Tang Y., Shao Q., Shi T. et al. Spatiotemporal dynamics of forest ecosystem carbon budget in Guizhou: customisation and application of the CBM-CFS3 model for China. *Carbon Balance Manage.* 2022;17:10. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13021-022-00210-0>.
22. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104570>.
23. Bryndina, L. Restoration of soil microbiological activity after herbicide stress / L. Bryndina, I. Svistova, O. Baklanova. *Forestry Engineering Journal.* 2022; 12 (46):43-55. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/4>.

Information about the authors

✉ *Elena N. Tikhonova* – Cand.Sci (Bio), assistant professor, Head of Landscape Architecture and Soil Science De-partment, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>, e-mail: tichonova-9@mail.ru

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

Anastasia A. Safonova – First-year master's student Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-0488-1963>, e-mail: anastasi.safonova18@gmail.com

Ella I. Treschevskaya – Dr. Sci (Agric.), Professor, Silviculture, Selection and Forest melioration Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8 Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1454-4095>, e-mail: ehllt@yandex.ru

Ye Jiaolong – Master degree of 3S and resources survey, Senior Engineer of Environmental Resources survey and Remote Sensing Sichuan institute of nuclear geology, No.35 Huaguan Road, Longtan Industrial Park, Chenghua District, Chengdu, Sichuan, P.R. China e-mail: yjl051766@163.com <https://orcid.org/0009-0009-1555-1597>.

Yuan Hong – Master degree of Computer Technology, Senior Engineer of Environmental Engineering Sichuan institute of nuclear geology, No.35 Huaguan Road, Longtan Industrial Park, Chenghua District, Chengdu, Sichuan, P.R. China e-mail: yhyuda@qq.com <https://orcid.org/0009-0007-8003-7215>.

Ma Chanhua – Master degree of Physics of earth, Intermediate Engineer of Environmental engineering Sichuan institute of nuclear geology, No.35 Huaguan Road, Longtan Industrial Park, Chenghua District, Chengdu, Sichuan, P.R. China e-mail: mchchengdu@163.com <https://orcid.org/0009-0004-0025-9829>.

Сведения об авторах

✉ *Тихонова Елена Николаевна* – к.б.н., зав. кафедрой ландшафтной архитектуры и почвоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-9039-9822>, e-mail: tichonova-9@mail.ru

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

Сафонова Анастасия Александровна – студентка первого курса магистратуры ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, <https://orcid.org/0000-0002-0488-1963>, e-mail: anastasi.safonova18@gmail.com

Трещевская Элла Игоревна – д.с.-х.н, проф. кафедры лесных культур, селекции и лесомелиорации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1454-4095>, e-mail: ehllt@yandex.ru

Е Цзяолун – специалист в области ГИС, старший инженер департамента разведки природных ресурсов и дистанционного зондирования Сычуаньского Института ядерной геологии, ул. Хуаян Чан Шунь, No. 328, пров. Сычуань, г. Чэнду, округ Шуанлю, КНР, 610052 <https://orcid.org/0009-0009-1555-1597>, e-mail: yjl051766@163.com

Юань Хун – специалист в области компьютерных технологий, старший инженер департамента организации природоохранной деятельности Сычуаньского Института ядерной геологии, ул. Хуаян Чан Шунь, No. 328, пров. Сычуань, г. Чэнду, округ Шуанлю, КНР, 610052, <https://orcid.org/0009-0007-8003-7215>, e-mail: yhyuda@qq.com

Ма Чаньхуа – специалист в области физики Земли, инженер департамента организации природоохранной деятельности Сычуаньского Института ядерной геологии, ул. Хуаян Чан Шунь, No. 328, пров. Сычуань, г. Чэнду, округ Шуанлю, КНР, 610052, <https://orcid.org/0009-0004-0025-9829>, e-mail: mchchengdu@163.com

✉– Для контактов /Corresponding author

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/18>

УДК 630*18 : 582.632.2



Морфо- и феноизменчивость *Picea pungens* Engelm.: анализ пластичности вида в урбосреде Воронежа

Светлана И. Дегтярева¹ ✉, degtjarewa-lana@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0003-3825-1158>

Валентина Д. Дорофеева¹, ekzo40@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-3624-6304>

Владимир А. Еськов¹, eskovvladimir2019@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-9456-3925>

Мария О. Красникова¹, masha13032001@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-1008-4933>

Елена М. Олейникова², cichor@agronomy.vsau.ru <https://orcid.org/0000-0002-4792-9170>

Владимир И. Торчик³, dendro@tut.by, <https://orcid.org/0000-0002-5986-6007>

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

² ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», ул. Мичурина, 1, г. Воронеж, 394087, Россия

³ Центральный ботанический сад НАН Беларуси, ул. Сурганова, 2В, г. Минск, 220012, Республика Беларусь

В Центрально-Черноземном регионе РФ с 2010 года всё более увеличивается разрыв между фенологическим развитием растений и абиотическими факторами среды. Для биоразнообразия флоры мегаполисов актуален вопрос подбора ассортимента из видов растений, устойчивых одновременно к комплексу изменений природного и антропогенного характера. Одним из таких видов является ель колючая (*Picea pungens* Engelm.). Исследовали диаметр ствола на высоте груди, высоту дерева, количество макростробил, длину и окраску хвои экземпляров ($N = 50$), произрастающих в городских насаждениях Воронежа. Длина хвои исследованных деревьев идентична длине хвои деревьев в естественном ареале. У 20-30-летних деревьев преобладают голубохвойные формы, отмечена достаточно сильная положительная корреляция между диаметром ствола и высотой дерева ($r = 0,65$). Фиксировали начало роста и окончания побегов, сроки заложения зимующих почек у деревьев ели колючей (*Picea pungens* Engelm.). Сроки вегетации исследованного вида сопоставимы с феноритмикой местного (аборигенного) вида ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.). Данные свидетельствуют о достаточно высокой приспособленности ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) к расширению ее потенциального ареала. Полагаем, что данный вид перспективен для повсеместного использования в различных рекреационных зонах мегаполисов. В будущем необходимо ответить на вопрос: как феноритмика изученного вида скажется на вегетативном воспроизводстве для формирования основы местного фенотипа?

Ключевые слова: ель колючая (*Picea pungens* Engelm.), интродуцент, морфология, фенология, урбосреда

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.


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


Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Морфо- и феноизменчивость *Picea pungens* Engelm. : анализ пластичности вида в урбосреде Воронежа / С. И. Дегтярева, В. Д. Дорофеева, В. А. Еськов, М. О. Красникова, Е. М. Олейникова, В. И. Торчик // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – №1. (49). – С. 268–280. – Библиогр. : С. 277–279 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/18>.


Поступила 02.02.2023. Пересмотрена 21.02.2023. Принята 28.02.2023. Опубликована онлайн 15.05.2023.


Morpho- and pheno-variability of *Picea pungens* Engelm.: analysis of the species plasticity in the Voronezh urban environment


Svetlana I. Degtyareva¹ ✉, degtjarewa-lana@yandex.ru,  0000-0003-3825-1158

Valentina D. Dorofeeva¹, ekzo40@mail.ru,  0000-0003-3624-6304

Vladimir A. Eskov¹, eskovvladimir2019@yandex.ru,  0000-0002-9456-3925

Maria O. Krasnikova¹, masha13032001@mail.ru  0000-0003-1008-4933

Elena M. Oleynikova², cichor@agronomy.vsau.ru  0000-0002-4792-9170

Vladimir I. Torchyk³, dendro@tut.by,  0000-0002-5986-6007

Abstract

In the Central Chernozem region of the Russian Federation, since 2010, the gap between the phenological development of plants and abiotic environmental factors has been increasing. In order to increase the biodiversity of the flora of megacities, the question of selecting an assortment of plant species that are resistant to a complex of natural and anthropogenic changes at the same time remains relevant. One of these species is the prickly spruce (*Picea pungens* Engelm.). The diameter of the trunk at chest height, the height of the tree, the number of macrostrobles, the length and color of the needles of specimens (N = 50) growing in urban plantations of Voronezh were studied. The length of the needles of the studied trees is identical to the length of the needles of trees in the natural range. In 20-30-year-old trees, blue-coniferous forms predominate, there is a fairly strong positive correlation between the diameter of the trunk and the height of the tree ($r = 0.65$). The beginning of growth and the end of shoots were recorded, the timing of the laying of wintering buds in prickly spruce trees (*Picea pungens* Engelm.). The vegetation period of the studied species is comparable with the phenorhythms of the local (aboriginal) species of European spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). The data indicate a sufficiently high adaptability of the prickly spruce (*Picea pungens* Engelm.) to the expansion of its potential range. We believe that this species is promising for widespread use in various recreational areas of megacities. In the future, it is necessary to answer the question: how will the phenorhythms of the studied species affect vegetative reproduction to form the basis of the local phenotype?

Keywords: blue spruce (*Picea pungens* Engelm.), introduced, morphology, phenology, urban forest

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgement: 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: Degtyareva S. I., Dorofeeva V.D., Eskov V.A., Krasnikova M.O., Oleynikova E.M., Torchyk V. I. (2023). Morpho- and pheno-variability of *Picea pungens* Engelm. : analysis of the species plasticity in the Voronezh urban environment. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 268-280 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/18>.

Received 02.02.2023. *Revised* 21.02.2023. *Accepted* 28.02.2023. *Published online* 15.05.2023.

Введение

Глобальная температура поверхности Земли значительно повысилась за последнее столетие, что вызвало экологические последствия, ограничивающие рост и размножение деревьев. В то же время, в некоторых северных районах планеты, наоборот, прослеживаются низкие температуры, сильные вет-

ры, длительный снежный покров и (или) прохладные и бедные питательными веществами почвы, которые действуют также как стрессоры на фитокомпонент [1, 2].

Такие явления могут, как замедлить, так и ускорить закаливание растений, что впоследствии приведет к изменению их фенологии, и увеличатся

риски растений к многофакторным процессам климата.

В Центрально-Чернозёмном Регионе РФ с 2010 г. повышение средних температур и возникновение аномальных тёплых (ложных) источников в осенне-зимний период влекут за собой раннее фенологическое развитие растений и повышение риска повреждения морозами [3].

Проводя исследования биологического характера в Воронежской области необходимо учитывать ещё одно природное изменение климата – смещение его в сторону аридизации. Экстремальные условия окружающей среды конкретного региона побуждают растения разрабатывать различные фенологические стратегии, чтобы справиться с суровыми условиями роста для их выживания и воспроизводства.

В связи с вышеизложенным, для сохранения и повышения биоразнообразия в определенном регионе всё чаще поднимается вопрос о подборе ассортимента различного географического происхождения растений.

С экономической и ландшафтной точек зрения вопрос о создании насаждений (питомников, парков, скверов), устойчивых к резко изменяющимся атмосферным воздействиям является открытым и динамически развивающимся.

В целом, для любого мегаполиса актуальным является создание устойчивых городских насаждений с привлечением растений-интродуцентов. Это делается с целью: повышения видового и структурного разнообразия, создания рекреационных зон с учетом современных требований. Предпринятые меры позволят оздоровить среду обитания и ввести новые виды, способные повысить эстетическое состояние города.

При формировании зелёных насаждений на первый план выходит наличие исчерпывающих сведений биолого-экологического характера: местах произрастания и районе интродукции растений; качестве и количестве видового состава. С другой стороны, экологический баланс определенной административной территории напрямую зависит от постепенного введения новых видов растений. Мы должны принимать во внимание экологический потенциал тех или иных видов и экономи-

ческую целесообразность использования конкретного растения. Состояние уже имеющейся растительности, сохранение видов местной флоры (как островков естественной растительности с целью сохранения природной специфики региона); введение новых видов с целью повышения биоразнообразия (но, в данном случае за введёнными видами требуется чёткий контроль за их распространением, взаимодействием с местными растениями, возбудителями заболеваний) – все эти данные необходимо аккумулировать с целью изучения всестороннего влияния на фитосреду [4-6].

Воронеж является мегаполисом, фитокомпонент которого испытывает на себе комплекс негативных факторов как природного, так и антропогенного характера. При озеленении любой территории, мы ставим перед собой задачи помимо подбора ассортимента, ещё и выбор качественного посадочного материала, желательного выращенного в своём регионе. Далее анализируем биолого-экологическую устойчивость выбранных видов: к выхлопным газам, способность очищать воздух от загрязнения в период вегетации, повышенные декоративные качества и т.д. Принимаем во внимание, что любой вид растений имеет весьма изменчивый от года к году образец воспроизводства, что сказывается на экобалансе территории [7-9]. Особенно осторожно большинство экологов рекомендуют использовать хвойные породы в городском озеленении. Мы рекомендуем постепенно вводить в городские насаждения ель колючую (*Picea pungens* Engelm.). Несмотря на долгую историю интродукционных исследований *Picea pungens* Engelm. не до конца изучен вопрос о связи между метеорологической изменчивостью с вегетативным ростом вида, его морфологическими и фенологическими признаками с одной стороны, и с другой стороны – генеративным состоянием и вегетативным воспроизводством вида [10, 11].

Цель исследования – изучить и провести сравнительный анализ морфо- и феноизменчивости ели колючей (*Picea pungens* Engelm.) в г. Воронеже.

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

По систематической иерархии ель колючая (*Picea pungens* Engelm.) относится к семейству Сосновые (Pinaceae). На своей родине вид имеет

высоту от 21 до 35 м (изредка 50) и диаметр от 0,9 м до 1,50 м. Данный вид встречается одиночно, в чистых хвойных лесах, горных лесах разнообразного видового состава. Естественный ареал ели (33° - 48° северной широты и 104° - 114° западной долготы), входит во флористическую область скалистых гор запада Северной Америки.

Предмет исследования – морфологические и фенологические признаки *Picea pungens* Engelm.

Дизайн исследования

Во временных промежутках с 2019 г. по 2022 г. исследовали процесс прироста боковых и главных побегов ели колючей (*Picea pungens* Engelm.), произрастающей в городских насаждениях Воронежа, дендрарии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (далее по тексту – дендрарий), питомнике ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии» (далее – питомник). Измеряли диаметр ствола на высоте груди и высоту деревьев. Фиксировали начало и окончание роста побегов, сроки заложения зимующих почек, количество макростробил, длину и окраску хвои, формы кроны.

Территория Воронежской области расположена в центральной полосе Восточно-Европейской равнины между 49° - 52° северной широты и 38° - 42° восточной долготы, занимает площадь 52,4 тыс. км² входит в состав Евразийской степной области. Суммы эффективных температур (градусо-дней), необходимых для начала некоторых фенологических процессов развития (выше $+10\dots+13^{\circ}$ C) меняются с северо-запада на юго-восток в диапазоне от 2 400°C до 2 900°C.

Количество экземпляров изучаемой породы – 50. Возраст растений от 20-30 лет (30 экземпляров) на улицах г. Воронежа и до 60-70 лет (20 экземпляров) в дендрарии и питомнике. Тридцатилетние ели также произрастают и в питомнике. В дендрарии, площадь которого 4,0 га, произрастает 9 экземпляров ели колючей с различным оттенком хвои.

Разные виды интродуцентов семейства Сосновых в зависимости от их географического происхождения различаются сезонной ритмикой роста

побегов. Виды, позже начинающие и позже заканчивающие рост, менее зимостойки, чем виды, у которых сроки начала и окончания роста более ранние. Величина сезонного прироста побега зависит от температуры и влажности воздуха в период роста: у некоторых видов, она зависит от температуры воздуха, у других от влажности. Кроме того, у одного и того же вида в разные годы изменяются сроки начала и окончания роста в зависимости от погодных условий вегетационного периода.

В соответствии с вышеизложенным мы фиксировали временные промежутки вегетации не только побегов ели колючей, но и ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.), которая является одной из основных лесобразующих пород лесной зоны РФ. По мнению многих авторов именно сроки вегетации являются индивидуальным биологическим показателем приспособленности интродуцентов к новым условиям существования и особенностью их развития [12-15]. Ель европейская служила для сравнения.

Путём систематических измерений (каждые 10 дней) и наблюдений начало и конец роста побегов, его продолжительность. В статистических расчётах использовали средние значения роста побегов.

Диаметр дерева определяли прибором мерной вилкой (алюминиевой) на высоте 1,3 м от поверхности земли. Методика измерений следующая – мерная вилка должна быть направлена перпендикулярно к стволу. Диаметр ствола рассчитывали как среднее из двух замеров в двух перпендикулярных направлениях. Точность измерения 1 см.

Высоту дерева измеряли высотомером SuuntoPM-5 с двух базисных расстояний: 10 и 20 м, точность измерений $\pm 2\%$.

Анализ данных

Для всех сравниваемых значений биометрических параметров исследуемых деревьев определяли основные статистические характеристики (среднее, ошибка среднего), используя программу Microsoft Excel, версия 13. По результатам проверки нормальности распределения диаметра и высоты применили метод парных корреляций, характеризуемый коэффициентом Пирсона r и критерием

значимости p , визуализируя их диаграммой рассеяния.

Результаты и обсуждение

На первом этапе своих исследований провели анализ дендрофлоры г. Воронежа. Оценили урбустойчивость ели колючей.

Анализ флористического состава хвойных г. Воронежа показал, что в урбанизированной среде используется всего 19 интродуцированных видов (без учёта форм и разновидностей). На наш взгляд, для г. Воронежа трудно найти среди хвойных видов, обладающий столькими полезными и декоративными свойствами как ель колючая (*Picea pungens* Engelm.). Многие авторы указывают на то, что ель колючая одна из немногих интродуцированных пород, которая является довольно устойчивой в городской среде и к различным антропогенным факторам, имеет высокие эстетические качества [16-18]. По числу декоративных форм она занимает одно из первых мест среди хвойных. Ель колючая зарекомендовала себя как одна из самых ценных в декоративном садоводстве пород, легко приживается при пересадках. Даже в зрелом возрасте устойчива в условиях загазованности и задымлённости городского воздуха, обладает сохранностью декоративной формы материнского растения.

Ель колючая, среди других интродуцентов отличается: высокой декоративностью (благодаря вечнозелёной хвое с различными оттенками окраски), строгими очертаниями кроны; характерным типом ветвления; крупными размерами; характеризуется индивидуальной и метамерной изменчивостью реакции хвои. Отсутствие механических повреждений на стволе и ветвях позволило сделать вывод, что по своим экологическим требованиям данный вид ели – зимостоек, морозоустойчив.

Непредсказуемыми природными факторами для Воронежской области являются: резкие и внезапные заморозки поздней весной; сильная засуха в летний период; оттепели в декабре и январе. Всё это приводит к изменению фенологических и фи-

зиологических процессов жизнедеятельности, а при семенном размножении – полной потери всходов после их успешного прорастания [19-21]. Необходимо было учитывать тот факт, что время распускания почек может совпадать с поздними весенними заморозками в регионе, и это предположительно может привести к замедлению развития.

Вторая задача исследования – выявить морфологические изменения, а также зафиксировать количественные и качественные параметры (форма кроны и её компактность, окраска хвои, визуально оценить количество экземпляров с макроростробилами, их окраску и обилие; измерить длину хвои).

Темп роста является одной из главных биологических особенностей растений при интродукции в новых условиях среды. Наблюдения за динамикой годичного прироста боковых побегов показали, что в течение времени изучения (2019-2022 г.г.) интенсивность роста меняется. Начинается рост во второй декаде апреля. Наиболее интенсивный рост происходит в конце апреля начале мая, при температуре $+16^{\circ}\text{C} \dots +17^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 45-50 %. При этом ритм роста имеет пульсирующий характер.

В г. Воронеже *Picea pungens* Engelm. высажена в парках, скверах, дендрарии, питомнике одиночно или небольшими группами, представители двух возрастных групп достигают различной высоты и диаметра.

Средний диаметр ствола варьирует от $0,23 \pm 0,003$ м (в группе 20-30 летних елей) до $0,42 \pm 0,005$ м (60-70 лет); средняя высота соответственно от $9,7 \pm 0,05$ м до $19,9 \pm 0,06$ м. Отмечена положительная корреляция между диаметром ствола и высотой дерева: как и следовало ожидать у молодых елей (20-30 летних) коэффициент корреляции $+0,65$ (ель до 10 лет растёт медленно, далее до 30 лет прослеживается интенсивный рост, затем замедляется), в группе 60-70 летних деревьев данный коэффициент чуть ниже и составляет $+0,55$ (рис. 1).

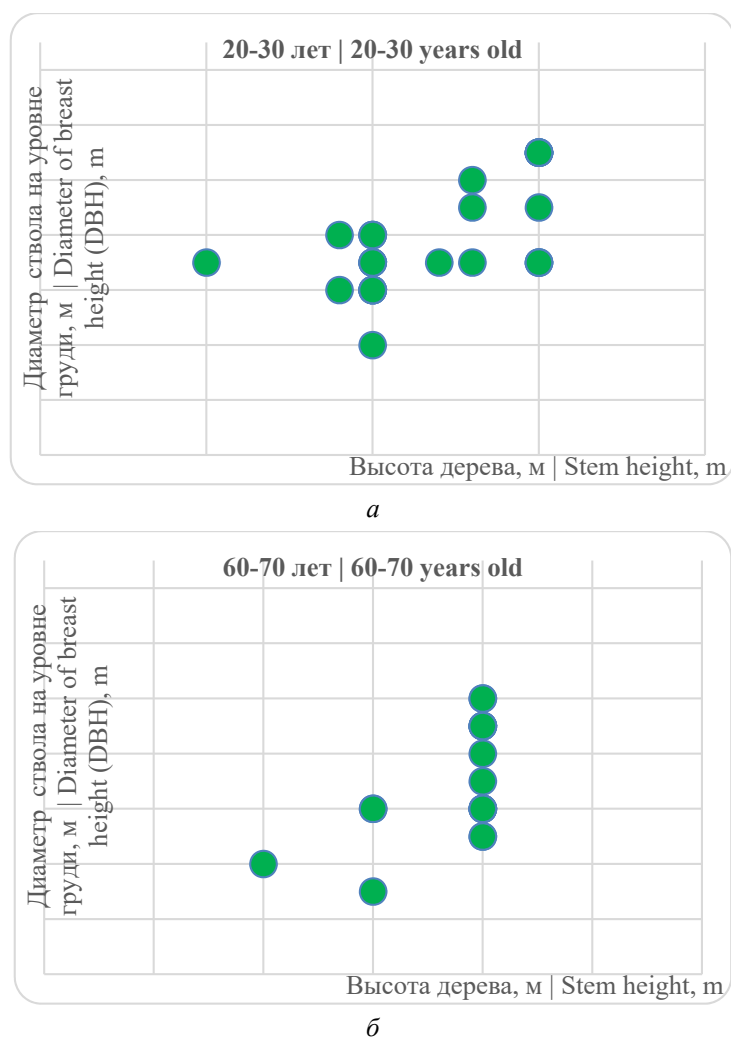


Рисунок 1. Средняя взаимосвязь роста верхушечных побегов 20-30 летних (а) и 60-70-летних (б) особей с температурой и влажностью воздуха

Figure 1. The relationship of the growth of apical shoots with temperature and humidity of the air

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Согласно наблюдениям, в г. Воронеже можно чётко говорить о 6 формах по окраске хвои (табл. 1). Наиболее чётко отличимые формы по окраске хвои: с голубой хвоей составляют – 34,0 %; сизой – 28,0 %; зелёной – 26,0 %. Анализ данных по 2 контрастным формам окраски хвои (зелено- и голубохвойные) выявил, что высота деревьев незначительно варьирует у 20-30 летних и 60-70-летних особей. По количественному составу голубохвойные формы (12 экземпляров) лидируют среди 20-30 летних елей, а зелёнохвойные (11) в категории от 60 до 70 лет (табл. 2). Исследования ещё раз показали широко распространённое явление у изучаемого вида – с возрастом голубой оттенок хвои снижается.

Таблица 1
Встречаемость деревьев *Picea pungens* Engelm. по цвету однолетних хвои

Table 1
The occurrence of trees of *Picea pungens* Engelm. by color of annual needles

Формы по окраске хвои Forms for the coloring of needles	Встречаемость хвои, % The occurrence of needles, %
Голубая Blue	34,0
Сизая Sizo	28,0
Зелёная Green	26,0
Сизо-зелёная Sizo-green	6,0
Темно-зелёная Dark-green	4,0

Формы по окраске хвой Forms for the coloring of needles	Встречаемость хвой, % The occurrence of needles, %
Беловато-голубая Whitish-blue	2,0

Источник: собственные экспериментальные данные

Source: own experimental data

Для того чтобы установить успешность прохождения феноритмики ели колючей в регионе тсследования провели аналогичные замеры побегов у ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.), которая, как мы и отмечали ранее, является лесообразующей породой в лесной зоне РФ. Проанализировали рост побегов и хвой за период с 2019 г. по 2022 г. в возрастном диапазоне растений от 20 до 30 лет и усреднённые данные представили в таблицах (табл. 3 и табл. 4).

Как видно из таблицы сроки вегетации обоих видов примерно одинаковы, отличаются тем, что развития хвой у ели европейской начинается на 11 дней раньше (табл. 3). Также установлено, что длина хвой *Picea pungens* Engelm. достигает размеров, зафиксированных у особей в естественном ареале. Это ещё раз свидетельствует о достаточно высокой степени приспособленности данного вида к новым условиям.

Начало роста побегов в разные годы фиксировали с 15-18 апреля, при температуре воздуха +11 °С ... +12 °С, относительной влажности воздуха 40 %. Период наиболее интенсивного роста побегов приходится на конец мая и середину июня, при температуре +16 °С...+20°С и относительной влажности 40-53 %. Отметим, что ель европейская опережает по величине прироста главного и боко-

вых побегов интродуцированную ель колючую, причём оба вида, как мы видим из таблицы, имеют практически равную продолжительность роста побегов 58-62 дня.

Таблица 2
Взаимосвязь возрастного диапазона *Picea pungens* Engelm. с окраской хвой

Table 2
The relationship of the age range of *Picea pungens* Engelm. with the coloring of needles

Возрастной диапазон растений, лет Plant age range, years	Группа деревьев по цвету хвой A group of trees by the color of needles	Количество деревьев, штук Number of trees, pieces	Высота, м (максимальная) Height, m (maximum)
20-30	Зеленохвойные Green-coniferous	2	9,4±0,02
	Голубохвойные Blue-tailed	12	10,1±0,02
60-70	Зеленохвойные Green-coniferous	11	19,0±0,02
	Голубохвойные Blue-tailed	5	20,0±0,02

Источник: собственные экспериментальные данные
Source: own experimental data

Таблица 3
Начало и конец роста хвой *Picea pungens* Engelm. и *Picea abies* (L.) Karst. в г. Воронеже и естественном ареале

Table 3
The beginning and the end of growth of *Picea pungens* Engelm. and *Picea abies* (L.) in Voronezh and the natural range

Вид Species	Начало роста (дата) The beginning of growth (date)		Конец роста (дата) The end of growth (date)		Длина хвой, см (г. Воронеж) Length of needles, cm (Voronezh)		Длина хвой, см (естественный ареал) Length of needles, cm (natural range)
	наиболее раннее the earliest	наиболее позднее the latest	наиболее раннее the earliest	наиболее позднее the latest	наиболее раннее the earliest	наиболее позднее the latest	
<i>P. pungens</i> Engelm.	16 мая 16 th of May	30 мая 30 th of May	4 июня 4 th June	17 июня 17 th June	1,9±0,02	1,3±0,02	1,5-3,0
<i>P. abies</i> (L.) Karst.	7 мая 7 th of May	27 мая 27 th of May	2 июня 2 th June	10 июня 10 th June	1,3±0,01	2,3±0,01	1,0-2,5 (3)

Источник: собственные экспериментальные данные
Source: own experimental data

Таблица 4

Период роста и величина прироста годичных побегов *Picea pungens* Engelm. и *Picea abies* (L.) Karst. в питомнике с 2019 г. по 2022 г.

Table 4

The growth period and the growth rate of annual shoots *Picea pungens* Engelm. and *Picea abies* (L.) Karst. in the nursery from 2019 to 2022

Вид Species	Рост боковых побегов Growth of lateral shoots		Продолжительность роста боковых побегов, дни Duration of growth of lateral shoots, days	Средняя величина прироста боковых побегов, см The average value of the growth of lateral shoots, cm	Средняя величина прироста главных побегов, см Average growth of the main shoots, cm
	начало (дата) beginning (date)	конец (дата) end (date)			
<i>P. abies</i> (L.) Karst.	15 апреля April 15	16 июня June 16	62	6,0±0,05a	24,6±0,06a
<i>P. pungens</i> Engelm.	18 апреля April 18	15 июня June 15	58	4,5±0,04b	17,5±0,05b

Примечание: средние значения, имеющие разные строчные буквы, статистически значимо различаются согласно пост-хок тесту с поправкой Бонферрони при уровне значимости $p < 0.05$.

Источник: собственные экспериментальные данные;
Source: own experimental data

На величину годового прироста в первую очередь оказывают влияние наследственные признаки вида, абиотические и биотические факторы. Из абиотических факторов среды на растения первоепенное влияние оказывают температура и влажность воздуха.

Проведенный корреляционный анализ выявил взаимосвязь между указанными выше факторами среды и ростом верхушечных побегов (рис. 2). На рисунке показана взаимосвязь роста с температурой и влажностью воздуха (показатели климатических факторах представлены на 15 июня).

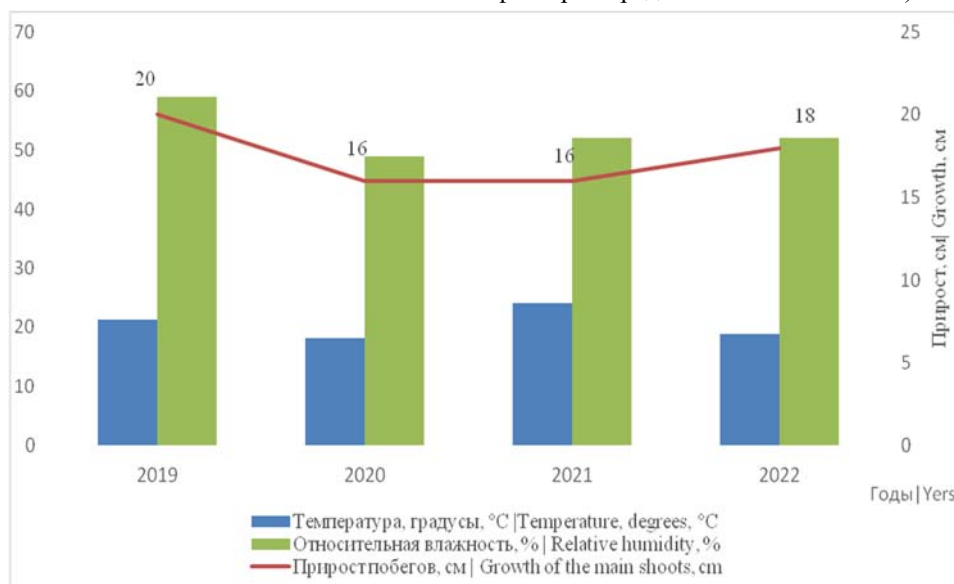


Рисунок 2. Взаимосвязь роста верхушечных побегов 20-30 летних особей с температурой и влажностью воздуха

Figure 2. The relationship of the growth of apical shoots with temperature and humidity of the air

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Заметная положительная корреляция между приростом и температурой воздуха отмечена и на начало развития (18 апреля), коэффициент корреляции +0,47 и на окончании роста (15 июня), коэффициент корреляции +0,49. Расчёт корреляции между приростом и влажностью воздуха показал, что для нормального развития изучаемого вида нужен более влажный воздух (коэффициент корреляции имеет отрицательное значение, составляет -0,32 и -0,39 соответственно).

Прекращение роста и заложение почек у ели колючей происходило в конце июня, начале июля, а общий временной промежуток от набухания до распускания составлял от 10 до 15 дней.

Отметили, что процесс одревеснения годичных побегов и формирование зимующей почки у большинства исследованных деревьев завершается до наступления осенних холодов – первые две недели июля. Это косвенно свидетельствует о завершении ростовых процессов и своевременности подготовки ели колючей к зимнему периоду.

Picea pungens Engelm. по форме кроны распределяется следующим образом: деревья с узкоконической кроной объединяют 19,0 % от всего количества, ширококонической – 26,0 %, конусовидной – 54,0 %. Отмечены также единичные деревья с колоннообразной формой кроны. Чуть менее половины всего состава (39,0 %) ели с компактной кроной.

Зафиксировали, что все экземпляры *Picea pungens* Engelm. вступают в генеративную фазу развития, а семеношение происходит раз в два-три года. Количество шишек на одном дереве ориентировочно 100-200. Размеры шишек: длина $7,8 \pm 0,03$ см, диаметр $2,2 \pm 0,01$ см. Число семян в шишке варьирует от 32 до 100-150 штук. Размеры семян: длина $0,32 \pm 0,003$ мм, ширина $0,20 \pm 0,003$ мм с преобладанием длиннокрылых семян (длина крылышка $0,89 \pm 0,003$ мм).

Заключение

В декоративных насаждениях г. Воронежа интродуцированные хвойные виды не получили широкого распространения. Без учёта форм и разновидностей насчитывается 19 видов.

На территории Воронежской области всё более увеличивается несоответствие между фенологическим развитием растений и окружающей средой. Среди самых опасных природных проявлений – положительные температуры воздуха в зимнее время, внезапные заморозки в тёплое время года, повышенная сухость воздуха в течение вегетационного периода. С целью увеличения видового разнообразия актуальным является постоянный подбор видов способных выдерживать многогранное и непредсказуемое влияние природных факторов среды и антропогенных.

Picea pungens Engelm., как и большинство хвойных видов, декоративна круглый год и устойчива к антропогенным факторам. Поэтому ель колючую целесообразно шире внедрять в урбонасаждения с учётом различных архитектурных форм и групп.

Несмотря на климатические несоответствия в регионе исследования, период наиболее интенсивного роста побегов *P. pungens* Engelm. в г. Воронеже приходится на конец апреля и начало мая, окончание роста зафиксировали во второй половине июня. Указанный временной период также является самым благоприятным для подавляющего количества древесных и видов местной флоры. Таким образом, результаты фенологических исследований свидетельствуют о пластичности ели колючей, т.е. способности вида не только существовать в изменяющихся климатических условиях, но даже и приспосабливаться в широком диапазоне количественных изменений. В данном случае можно говорить о расширении культивируемого ареала *P. pungens* Engelm [23, 24].

Полученные результаты свидетельствует о достаточно высокой степени приспособленности ели колючей к новым условиям существования: длина хвои достигает тех же размеров, свойственных в естественном ареале; у 20-30-летних деревьев отмечена положительная корреляция между диаметром ствола и высотой дерева (коэффициент корреляции $r = 0,65$); также среди молодых деревьев лидируют голубохвойные формы (12 экземпляров). Оценка роста побегов у аборигенного вида *Picea abies* (L.) Karst. показала, что сроки вегетации примерно одинаковы у обоих видов. Отличие

только в том, что начало роста хвои у ели европейской начинается на 11 дней раньше.

Процесс одревеснения годичных побегов у подавляющего большинства экземпляров завершается до наступления осенних холодов.

Полагаем, что данный вид перспективен для повсеместного использования в различных рекреационных зонах мегаполисов.

В будущих исследованиях необходимо ответить на вопрос: как феноритмика изученного вида сказывается на воспроизводстве при формировании местного фенотипа?

В планах работы – использовать вегетативное размножение вида посредством черенкования. При этом внимание следует обратить на маточные деревья с одновременной оценкой их эколого-биологических свойств и декоративности.

Список литературы

1. Martin Hadad, Jacques C.Tardif, France Conciatori, Justin Waito, Alana Westwood. Climate and atmospheric circulation related to frost-ring formation in *Picea mariana* trees from the Boreal Plains, interior North America. *Weather and Climate Extreme*. 2020;29: 100264. DOI: // <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100264>.
2. Lidia A. Semkina. Growth and Productivity of Non-Indigenous Woody Species in the Middle Urals. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*. 2021; 6: 100-109. DOI: // <https://dx.doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-100-109>.
3. Климат Воронежа – Погодаиклимат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru>
4. Alexey V. Kabonen, Natalya V. Ivanova. Tree attribute assessment in urban greenwood using ground-based LiDAR and multiseasonal aerial photography data. *Nature Conservation Research*. 2023; 8(1): 64-83. DOI: // <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.
5. Xi Cao, Fang Gao, Caiyun Qin, Shigang Chen, Jufeng Cai, Changbin Sun, Yuhui Weng, Jing Tao. Optimizing Somatic Embryogenesis Initiation, Maturation and Preculturing for Cryopreservation in *Picea pungens*. *Forests*. 2022; 13(12): 2097. DOI: // <https://dx.doi.org/10.3390/f13122097>.
6. Zdeněk Vacek, Jan Cukor, Stanislav Vacek, Rostislav Linda, Anna Prokúpková, Vilém Podrůzský, Josef Gallo, Oldřich Vacek, Václav Šimůnek, Ondřej Drábek, Vojtěch Hájek, Marko Spasić, Jakub Brichta. Production potential, biodiversity and soil properties of forest reclamations: Opportunities or risk of introduced coniferous tree species under climate change? *European Journal of Forest Research*. 2021; 140(5): 1243-1266. DOI: // <https://dx.doi.org/10.1007/s10342-021-01392-x>.
7. Francesco Ferrini, Alessio Fini, Jacopo Mori, Antonella Gori. Role of vegetation as a mitigating factor in the urban context. *Sustainability*. 2021; 12(10): 4247. DOI: // <https://dx.doi.org/10.3390/su12104247>.
8. Idalia Kasprzyk, Tomasz Wójcik, Paloma Cariñanos, Katarzyna Borycka, Agata Ćwik. Evaluation of the allergenicity of various types of urban parks in a warm temperate climate zone. *Aerobiologia*. 2018; 35(1): 57-71. DOI: // <https://dx.doi.org/10.1007/s10453-018-9537-3>.
9. Anna Kulkova, Natalia Besschetnova, Vladimir Besschetnova. Multiparameter Evaluation of the Taxonomic Proximity of the Species of Spruce (*Picea A. Dietr.*) in the Pigment Composition of Needles. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2018; 1(37): 5-18. DOI: // <https://dx.doi.org/10.15350/2306-2827.2018.1.5>.
10. T.V. Zubkova, O.A. Dubrovina. The study of ecological and biological condition of colorado spruce (*Picea pungens* Engelm.) in the urban environment of yelets cit. *Pomiculture and small fruits culture in Russia*. 2019; 57(1): 61-66. DOI: // <https://dx.doi.org/10.31676/2073-4948-2019-57-61-66>.
11. Sergei V. Skupnevskii, Valerii N. Rakitskii, Tatina A. Synitskaya, Igor A. Nikolaev, Victoriya V. Tsagaeva. Efficiency of usage evergreen plants as test objects of hygiene monitoring in an industrial city. *Hygiene and sanitation*. 2020; 99 (7): 669-673. DOI: // <https://dx.doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-7-669-673>.
12. Dimitar Petrov Dimitrov, Miglena Zhiyanski. Dendrochronological analysis of the influence of climate on autochthonous and introduced coniferous tree species in the city park "Prostor", Kardzhali. *Silva Balcanica*. 2022; 23(1): 11-19. DOI: // <https://dx.doi.org/10.3897/silvabalcanica.23.e79249>.

13. Junchen Wang, Jianwei Ma, Fangqun Ouyang, Junhui Wang, Lu Song, Lisheng Kong, Hanguo Zhang. Intrinsic relationship among needle morphology, anatomy, gas exchanges and tree growth across 17 *Picea* species. *New Forests*. 2020; 52(3): 509-535. DOI: //https://dx.doi.org// 10.1007/s11056-020-09808-z.
14. Vaclav Sticha, Ram P. Sharma, Zdenek Vacek, Stanislav Vacek, Ondrej Nuhlicek. Timber and Branch Volume Prediction: Effects of Stand and Site Characteristics on Dendromass and Timber-To-Branch Volume Ratio of Norway Spruce in Managed Forests. *Forests*. 2019; 10(2): 144. DOI: // https://doi.org/10.3390/f10020144.
15. Zdenek Vacek, Stanislav Vacek, Anna Prokupkova, Daniel Bulusek, Vilem Podrazsky, Iva Hunova, Tereza Putalova, Jan Kral. Long-term effect of climate and air pollution on health status and growth of *Picea abies* (L.) Karst. peaty forests in the Black Triangle region. *Dendrobiology*. 2020; 83: 1-19. DOI: // http://dx.doi.org/10.12657/denbio.083.001.
16. O.S. Zalivskaya, N.A. Babich. Assessment of decorative plantings. *Lesnoy Zhurnal* (Forestry Journal). 2020; 6: 98-110. DOI: // https://dx.doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-98-110.
17. M.J. Vergotti, M. Fernandez-Martinez, S.C. Kefauver, I.A. Janssens, J. Penuelas. Weather and trade-offs between growth and reproduction regulate fruit production in European forests. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019; 279: 107711. DOI: // https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107711.
18. Lyudmila Lyashcheva, Aleksandr Lyashchev, Irina Prok. Influence of biologically active substances, chemicals and growth regulators on diseases of conifers in urban conditions. *BIO Web of Conferences*. 2020; 43: 2024-2024. DOI: https://dx.doi.org/10.1051/bioconf/20224302024.
19. L.C. Fonseca, T.A. Magalhaes, L.A. Melo, L.S. Oliveira, G.E. Brondani. Rescue and vegetative propagation of *Eremanthus erythropappus* (DC.). MacLeish in natural stand. *Brazilian Journal of Biology*. 2021; 81 (3). DOI: https://doi.org/10.1590/1519-6984.225119.
20. Hänninen H., Kramer K., Tanino K., Zhang R., Wu J and Fu Y. Experiments are necessary in process-based tree phenology modelling. *Trends Plant*. 2019; Volume 24(3): 199-209. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.006.
21. Малюков С. В., Эксплуатация почвообрабатывающих орудий в условиях нераскорчеванных вырубок европейской части России: анализ препятствий в виде пней и корней / С. В. Малюков, Е. В. Поздняков, С. И. Дегтярева, М. В. Шавков, М. А. Малюкова, И. И. Шанин, С. Е. Арико // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 4 (48). – С. 96–113. – DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/7.

References

1. Martin Hadad, Jacques C. Tardif, France Conciatori, Justin Waito, Alana Westwood. Climate and atmospheric circulation related to frost-ring formation in *Picea mariana* trees from the Boreal Plains, interior North America. *Weather and Climate Extreme*. 2020; 29: 100264. DOI: // https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100264.
2. Lidia A. Semkina. Growth and Productivity of Non-Indigenous Woody Species in the Middle Urals. *Lesnoy Zhurnal* (Forestry Journal). 2021; 6: 100-109. DOI: // https://dx.doi.org// 10.37482/0536-1036-2021-6-100-109.
3. Voronezh climate – Weather and climate URL: http://http://www.pogodaiklimat.ru
4. Alexey V. Kabonen, Natalya V. Ivanova. Tree attribute assessment in urban greenwood using ground-based LiDAR and multiseasonal aerial photography data. *Nature Conservation Research*. 2023; 8(1): 64-83. DOI: // https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2023.005.
5. Xi Cao, Fang Gao, Caiyun Qin, Shigang Chen, Jufeng Cai, Changbin Sun, Yuhui Weng, Jing Tao. Optimizing Somatic Embryogenesis Initiation, Maturation and Preculturing for Cryopreservation in *Picea pungens*. *Forests*. 2022; 13(12): 2097. DOI: // https://dx.doi.org / 10.3390/f13122097.
6. Zdeněk Vacek, Jan Cukor, Stanislav Vacek, Rostislav Linda, Anna Prokúpková, Vilém Podrázský, Josef Gallo, Oldřich Vacek, Václav Šimůnek, Ondřej Drábek, Vojtěch Hájek, Marko Spasić, Jakub Brichta. Production potential, biodiversity and soil properties of forest reclamations: Opportunities or risk of introduced coniferous tree species under climate change? // *European Journal of Forest Research*. 2021; 140(5): 1243-1266. DOI: // https://dx.doi.org/10.1007/s10342-021-01392-x.

7. Francesco Ferrini , Alessio Fini , Jacopo Mori , Antonella Gori. Role of vegetation as a mitigating factor in the urban context. *Sustainability*. 2021; 12(10): 4247. DOI: // <https://dx.doi.org/10.3390/su12104247>.
8. Idalia Kasprzyk, Tomasz Wójcik, Paloma Cariñanos, Katarzyna Borycka, Agata Ćwik. Evaluation of the allergenicity of various types of urban parks in a warm temperate climate zone. *Aerobiologia*. 2018; 35(1): 57-71. DOI: // <https://dx.doi.org/10.1007/s10453-018-9537-3>.
9. Anna Kulkova, Natalia Besschetnova, Vladimir Besschetnova. Multiparameter Evaluation of the Taxonomic Proximity of the Species of Spruce (*Picea A. Dietr.*) in the Pigment Composition of Needles. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2018; 1(37): 5-18. DOI: // <https://dx.doi.org/10.15350/2306-2827.2018.1.5>.
10. T.V. Zubkova, O.A. Dubrovina. The study of ecological and biological condition of colorado spruce (*Piceapungens* Engelm.) in the urban environment of yelets cit. *Pomiculture and small fruits culture in Russia*. 2019; 57(1): 61-66. DOI: // <https://dx.doi.org/10.31676/2073-4948-2019-57-61-66>.
11. Sergei V. Skupnevskii , Valerii N. Rakitskii , Tatina A. Synitskaya , Igor A. Nikolaev , Victoriya V. Tsagaeva. Efficiency of usage evergreen plants as test objects of hygiene monitoring in an industrial city. *Hygiene and sanitation*. 2020; 99 (7): 669-673. DOI: // <https://dx.doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-7-669-673>.
12. Dimitar Petrov Dimitrov, Miglena Zhiyanski. Dendrochronological analysis of the influence of climate on autochthonous and introduced coniferous tree species in the city park "Prostor", Kardzhali. *Silva Balcanica*. 2022; 23(1): 11-19. DOI: // <https://dx.doi.org/10.3897/silvabalcanica.23.e79249>.
13. Junchen Wang , Jianwei Ma, Fangqun Ouyang , Junhui Wang, Lu Song, Lisheng Kong, Hanguo Zhang. Intrinsic relationship among needle morphology, anatomy, gas exchanges and tree growth across 17 *Picea* species. *New Forests*. 2020; 52(3): 509-535. DOI: // <https://dx.doi.org/10.1007/s11056-020-09808-z>.
14. Vaclav Sticha, Ram P. Sharma, Zdenek Vacek, Stanislav Vacek, Ondrej Nuhlicek. Timber and Branch Volume Prediction: Effects of Stand and Site Characteristics on Dendromass and Timber-To-Branch Volume Ratio of Norway Spruce in Managed Forests. *Forests*. 2019; 10(2): 144. DOI: // <https://doi.org/10.3390/f10020144>.
15. Zdenek Vacek, Stanislav Vacek, Anna Prokupkova, Daniel Bulusek, Vilem Podrazsky, Iva Hunova, Tereza Putalova, Jan Kral. Long-term effect of climate and air pollution on health status and growth of *Picea abies* (L.) Karst. peaty forests in the Black Triangle region. *Dendrobiology*. 2020; 83: 1-19. DOI: // <http://dx.doi.org/10.12657/denbio.083.001>.
16. O.S. Zalivskaya, N.A. Babich. Assessment of decorative plantings. *Lesnoy Zhurnal (Forestry Journal)*. 2020; 6: 98-110. DOI: // <https://dx.doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-98-110>.
17. M.J. Vergotti, M. Fernandez-Martinez, S.C. Kefauver, I.A. Janssens, J. Penuelas. Weather and trade-offs between growth and reproduction regulate fruit production in European forests. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019; 279: 107711. DOI: // <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107711>.
18. Lyudmila Lyashcheva, Aleksandr Lyashchev, Irina Prok. Influence of biologically active substances, chemicals and growth regulators on diseases of conifers in urban conditions. *BIO Web of Conferences*. 2020; 43: 2024-2024. DOI: // <https://dx.doi.org/10.1051/bioconf/20224302024>.
19. L.C. Fonseca, T.A. Magalhaes, L.A. Melo, L.S. Oliveira, G.E. Brondani. Rescue and vegetative propagation of *Eremanthus erythropappus* (DC.). *MacLeish in natural stand. Brazilian Journal of Biology*. 2021; 81 (3). DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.225119>.
20. Hänninen H., Kramer K., Tanino K., Zhang R., Wu J and Fu Y. Experiments are necessary in process-based tree phenology modelling. *Trends Plant*. 2019; Volume 24(3): 199-209. DOI: // <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.006>.
21. Malyukov S. V., Ekspluatatsiya pochvoobrabatyvayushchih orudij v usloviyah neraskorchevannyh vyrubok evropejskoj chasti Rossii: analiz prepyatstvij v vide pnej i kornej / S. V. Malyukov, E. V. Pozdnyakov, S. I. Degtyareva, M. V. Shavkov, M. A. Malyukova, I. I. Shanin, S. E. Ariko // *Forestry Engineering Journal*. – 2022. – Т. 12. – № 4 (48). – S. 96–113. – Bibliogr.: s. 106–112 (42 nazv.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.4/7>.

Сведения об авторах

✉ *Дегтярева Светлана Ивановна* – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры ботаники и физиологии растений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3825-1158>, e-mail: degtjarewa-lana@yandex.ru.

Дорофеева Валентина Дмитриевна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры ботаники и физиологии растений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3624-6304>, e-mail: ekzo40@mail.ru.

Еськов Владимир Андреевич – студент 4 курса лесного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: eskovvladimir2019@yandex.ru.

Красникова Мария Олеговна – студент 3 курса лесного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: masha13032001@mail.ru.

Олейникова Елена Михайловна – доктор биологических наук, профессор кафедры селекции, семеноводства и биотехнологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», ул. Мичурина, 1 г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, e-mail: cichor@agronomy.vsau.ru.

Торчик Владимир Иванович – доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заведующий лабораторией декоративного садоводства Центрального ботанического сада НАН Беларуси, ул. Сурганова, 2В, г. Минск, 220012, Республика Беларусь, e-mail: dendro@tut.by

Information about authors

✉ Svetlana I. Degtyareva – Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Botany and Plant Physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, orcid: <http://orcid.org/0000-0003-3825-1158>, e-mail: degtjarewa-lana@yandex.ru.

Valentina D. Dorofeeva – Cand. Sci (Agric), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Botany and Plant Physiology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, orcid: <http://orcid.org/0000-0003-3624-6304>, e-mail: ekzo40@mail.ru.

Vladimir A. Eskov – 4th year student of the Faculty of Forestry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: eskovvladimir2019@yandex.ru

Maria O.Krasnikova – 3th year student of the Faculty of Forestry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, e-mail: masha13032001@mail.ru

Elena M.Oleynikova – Dr. Sci. (Biol.), the professor Departments of breeding, seed production and Biotechnology, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Michurina str., 1, Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: cichor@agronomy.vsau.ru.

Vladimir I. Torchyk – Dr. Sci. (Biol.), Professor, Corresponding member of the NAS, Head of Decorative Gardening Laboratory Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, 2v Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: dendro@tut.by.

✉ – Для контактов /Corresponding author

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2023 Том 13 № 1 (49)

Подписано в печать 15.05.2023. Формат 60×90 1/8.

Дата выхода в свет XX.XX.2023. Цена р.

Усл. печ. л. 35,25. Уч.-изд. л. 60,9. Тираж 1000 экз. Заказ

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Адрес редакции и издателя: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8

телефон (473) 253-72-90, факс (473) 253-76-51, e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

Отпечатано в Участке оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»

394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific journal

2023 Vol. 13 № 1 (49)

Signed to be published 15.05.2023. Format 60×90 1/8.

Publication date **XX.XX.2023.** Price rub.

Cond. print. sh. 35,25. Acc.-print. sh. 60,9. Printing 1000 copies. **Order**

Publisher: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov» (FSBEI HE «VSUFT»)

Publisher address: FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov»

Timiryazeva str., 8, Voronezh 394087

phone (473) 253-72-90, fax (473) 253-76-51, e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

Printed at the Department of Operational Printing

FSBEI HE «VSUFT»

Dokuchaeva str., 10, Voronezh 394087