

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

Основан в 1833 г.
Издается в серии ИВУЗ с 1958 г.
Выходит 6 раз в год

3

2022

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ – СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ)
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

МЕЛЕХОВ В.И. – гл. редактор, д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
БАБИЧ Н.А. – зам. гл. редактора, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
БОГОЛИЦЫН К.Г. – зам. гл. редактора, д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
АНГЕЛЬСТАМ П. – зам. гл. редактора по европейскому направлению, д-р наук, проф. (Швеция, Скиннскаттеберг)
КОМАРОВА А.М. – отв. секретарь, канд. с.-х. наук (Россия, Архангельск)

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Бессчетнов В.П., д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)
Богданович Н.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Буй Тэ Дой, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Ван Хайнинген А., д-р наук, проф. (США, Ороно)
Воронин А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Гаврилова О.И., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)
Ефремова С.В., д-р техн. наук, проф. (Республика Казахстан, Алматы)
Залесов С.В., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Кожухов Н.И., д-р экон. наук, проф., акад. РАН (Россия, Москва)
Корчагов С.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Вологда)
Куров В.С., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Лупашку Т.Г., д-р хим. наук, проф., акад. АНМ (Республика Молдова, Кишинев)
Матвеева Р.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)
Мерзленко М.Д., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)
Мясищев Д.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Наквасина Е.Н., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Нимц П., д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)
Обливин А.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Онегин В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Памфилов Е.А., д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)
Посыпанов С.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Сакса Т., д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)
Санаев В.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)
Сергеевичев В.В., д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)
Сёренсен У.Я., д-р наук, проф. (Норвегия, Стейнхьер)
Сигурдссон Б.Д., д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)
Усольцев В.А., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)
Хабаров Ю.Г., д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)
Хакимова Ф.Х., д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)
Хоанг Ван Сэм, д-р наук, науч. сотр. (Вьетнам, Ханой)
Холуша О., д-р наук, проф. (Чехия, Брно)
Царев А.П., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Воронеж)
Черных В.Л., д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)
Энгельманн Х.-Д., д-р инж. наук, проф. (Германия, Эмден)

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

Established in 1833

Issued as part of the

“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958

Published bi-monthly

3

2022

FOUNDER AND PUBLISHER: NORTHERN (ARCTIC)
FEDERAL UNIVERSITY NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV

EDITORIAL BOARD:

MELEKHOV V.I. – Editor-in-Chief, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
BABICH N.A. – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
BOGOLITSYN K.G. – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
ANGELSTAM P. – Deputy Editor-in-Chief of the European Department, PhD, Prof. (Sweden, Skinnskatteberg)
KOMAROVA A.M. – Executive Secretary, Candidate of Agriculture (Russia, Arkhangelsk)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

Besschetnov V.P., Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)
Bogdanovich N.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Bui The Doi, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Van Heiningen A., PhD, Prof. (USA, Orono)
Voronin A.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Gavrilova O.I., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Petrozavodsk)
Efremova S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Republic of Kazakhstan, Almaty)
Zalesov S.V., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Kozhukhov N.I., Doctor of Economics, Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)
Korchagov S.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Vologda)
Kurov V.S., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Lupascu T.G., Doctor of Chemistry, Prof., Academician of the Academy of Sciences of Moldova (Republic of Moldova, Chisinau)
Matveeva R.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)
Merzlenko M.D., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)
Myasishchev D.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Nakvasina E.N., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Niemz P., PhD, Prof. (Switzerland, Zurich)
Oblivin A.N., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Onegin V.I., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Pamfilov E.A., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)
Posypanov S.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Saksa T., Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)
Sanaev V.G., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)
Sergeevichev V.V., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint Petersburg)
Sørensen O.J., PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)
Sigurðsson B.D., PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)
Usol'tsev V.A., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)
Khabarov Yu.G., Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)
Khakimova F.Kh., Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)
Hoang Van Sam, PhD, Senior Researcher (Vietnam, Hanoi)
Holuša O., PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)
Tsarev A.P., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Voronezh)
Chernykh V.L., Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)
Engelmann H.-D., Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>Л.В. Ветчинникова, А.Ф. Титов.</i> Реинтродукция карельской березы.....	9
<i>Т.А. Рубцова, А.М. Зубарева.</i> Характеристика медоносных угодий и их пожароопасность в Еврейской автономной области.....	32
<i>И.Я. Чеплянский, Т.Я. Турчин, А.С. Ермолова.</i> Дистанционный мониторинг государственных защитных лесных полос степной зоны европейской части России.....	44
<i>Н.П. Братилова, Н.В. Моксина, О.А. Герасимова.</i> Отбор полусибов видов рода <i>Malus</i> L. по показателям роста и формирования в пригородной зоне Красноярска.....	60
<i>Г.Н. Гордеева, А.И. Лобанов.</i> Продолжительность жизненного цикла и зимостойкость древесных интродуцентов в сухостепной зоне Хакасии	73
<i>С.С. Макаров, И.Б. Кузнецова, А.В. Заушишцена, Е.И. Куликова, Г.В. Тяк, Т.В. Курлович.</i> Повышение эффективности многоцелевого лесопользования на выработанных торфяниках.....	91
<i>Б.В. Бабиков, М.Б. Субота.</i> Гидромелиорация в лесном хозяйстве: история научных исследований.....	103
<i>В.В. Лепеско, Л.П. Рыбашлыкова.</i> Особенности роста вяза приземистого на бурых почвах Астраханской полупустыни.....	119

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

<i>К.П. Рукомойников, Е.М. Царев, С.Е. Анисимов, Д.С. Татаринев, В.О. Купцова, Т.А. Гилязова.</i> Модернизация валочно-сучкорезно-раскряжевочного механизма лесного харвестера.....	130
<i>А.Н. Заикин, В.В. Сиваков, Н.А. Булхов, С.А. Коньшакова, С.Г. Кузнецов.</i> Применение комплексов лесозаготовительных машин в условиях Республики Башкортостан.....	139

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>Д.В. Иванов, К.Э. Бака, Д.А. Конарейкина.</i> Измельченные бумажно-смоляные пленки как реакционно-способные наполнители карбамидоформальдегидных смол.....	153
---	-----

- Д.А. Чибрикин, М.В. Лукин, А.В. Лукина, Т.В. Тюрикова, С.И. Рощина.*
Численное исследование напряженно-деформированного состояния
модифицированной деревянной балки..... 167

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- Е.Н. Коптелова, Н.А. Кутакова, С.И. Третьяков, А.В. Фалева.* Кинетиче-
ские закономерности процесса водно-щелочного гидролиза березо-
вой коры в СВЧ-поле..... 179
- С.Д. Пименов, Г.В. Мзюков, А.И. Сизов.* Гидролиз целлюлозы с использова-
нием газоздушных смесей хлористого водорода..... 191

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- О.В. Скуднева.* Навигационно-пилотажная система транспортных беспил-
отных летательных аппаратов для лесохозяйственной практики..... 203
- В.И. Лисицын, М.В. Драпалюк, Н.Н. Матвеев.* Моделирование динамики
хода роста древостоев на основе термодинамического подхода..... 213
-



CONTENTS

FORESTRY

<i>L.V. Vetchinnikova, A.F. Titov.</i> Reintroduction of Curly Birch.....	9
<i>T.A. Rubtsova, A.M. Zubareva.</i> Characteristics of Melliferous Lands and Their Fire Hazard in the Jewish Autonomous Region.....	32
<i>I.Ya. Cheplyanskij, T.Ya. Turchin, A.S. Ermolova.</i> Remote Monitoring of State Forest Shelterbelts in the Steppe Zone of European Russia.....	44
<i>N.P. Bratilova, N.V. Moksina, O.A. Gerasimova.</i> Selection of Half-Sib Species of the Genus <i>Malus</i> L. by Growth and Formation Parameters in the Suburban Area of Krasnoyarsk.....	60
<i>G.N. Gordeeva, A.I. Lobanov.</i> Life Expectancy and Winter Hardiness of Introduced Woody Plants in the Dry-Steppe Zone of Khakassia.....	73
<i>S.S. Makarov, I.B. Kuznetsova, A.V. Zaushintsena, E.I. Kulikova, G.V. Tyak, T.V. Kurlovich.</i> Improving the Efficiency of Multipurpose Forest Management of Depleted Peatlands.....	91
<i>B.V. Babikov, M.B. Subota.</i> Hydromelioration in Forestry: History of Research..	103
<i>V.V. Lepesko, L.P. Rybashlykova.</i> Growth Features of Siberian Elm on Brown Soils of the Astrakhan Semi-Desert.....	119

LOGGING TECHNOLOGIES

<i>K.P. Rukomojnikov, E.M. Tsarev, S.E. Anisimov, D.S. Tatarinov, V.O. Kuptcova, T.A. Gilyazova.</i> Upgrading the Feller-Delimiter-Crosscutter Mechanism of a Forest Harvester.....	130
<i>A.N. Zaikin, V.V. Sivakov, N.A. Bulkhov, S.A. Konshakova, S.G. Kuznetsov.</i> The Use of Logging Machinery Sets in the Republic of Bashkortostan.....	139

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>D.V. Ivanov, K.E. Baka, D.A. Konareikina.</i> Powdered Paper-Resin Films as Reactive Fillers for Urea-Formaldehyde Resins.....	153
<i>D.A. Chibrikin, M.V. Lukin, A.V. Lukina, T.V. Tyurikova, S.I. Roshchina.</i> Numerical Study of the Stress-Strain State of a Modified Wooden Beam.....	167

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- E.N. Koptelova, N.A. Kutakova, S.I. Tret'yakov, A.V. Faleva. Kinetics of Water-Alkaline Hydrolysis of Birch Bark in a Microwave Field.....* 179
- S.D. Pimenov, G.V. Mzokov, A.I. Sizov. Cellulose Hydrolysis Using Hydrogen Chloride Gas-Air Mixtures.....* 191

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

- O.V. Skudneva. Flight Navigation System of Transport Unmanned Aerial Vehicles for Forestry Practice.....* 203
- V.I. Lisitsyn, M.V. Drapalyuk, N.N. Matveev. Modeling the Forest Stand Growth Dynamics Based on the Thermodynamic Approach.....* 213
-



Обзорная статья

УДК 582.632.1:581.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-9-31

Реинтродукция карельской березы

Л.В. Ветчинникова^{1✉}, *д-р биол. наук, доц., гл. науч. сотр.*; *ResearcherID: [J-5665-2018](https://orcid.org/0000-0003-2091-905X)*,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2091-905X>

А.Ф. Титов^{2,3}, *чл.-кор. РАН, д-р биол. наук, проф., гл. науч. сотр.*;
ResearcherID: [A-6705-2014](https://orcid.org/0000-0001-6880-2411), *ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-2411>*

¹Институт леса ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; vetchin@krc.karelia.ru[✉]

²Институт биологии ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; titov@krc.karelia.ru

³Отдел комплексных научных исследований ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; titov@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 29.05.20 / Одобрена после рецензирования 05.09.20 / Принята к печати 07.09.20

Аннотация. Обобщены и систематизированы результаты научных исследований отечественных и зарубежных авторов за последние несколько десятилетий, касающиеся реинтродукции карельской березы *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti. Кратко изложен вопрос о современном состоянии ее ресурсов. Отмечены основные причины их сокращения в конце XX – начале XXI вв.: массовые незаконные рубки, исчезновение или значительное изменение характерных мест обитания карельской березы, биологические особенности данного вида (фрагментированный ареал, низкая конкурентоспособность и др.). Приводятся основные итоги интродукционной работы с карельской березой на территориях, которые находятся далеко за пределами ее ареала (преимущественно на юго-востоке от типичных мест произрастания). Показано, что отечественный опыт реинтродукции карельской березы основан прежде всего на создании лесных культур и организации особо охраняемых природных территорий. Отмечены результаты реинтродукции карельской березы за рубежом: в Финляндии, Швеции, Норвегии, Германии, Белоруссии и др. Несмотря на неодинаковую результативность (зависящую от многих факторов) работ по реинтродукции в разных странах, в целом она внесла и вносит существенный вклад в сохранение и увеличение ресурсов карельской березы – уникального представителя европейской лесной дендрофлоры. Важно и то, что при реинтродукции, проведенной в разные годы и в разных почвенно-климатических условиях, у карельской березы сохраняются ее главные биологические особенности: узорчатая текстура в древесине, разнообразие форм роста и характера поверхности ствола. Это дополнительно подтверждает ранее предложенную авторами гипотезу о возможности придания карельской березе статуса самостоятельного биологического вида. На основании анализа накопленных данных высказано мнение



о необходимости осуществления реинтродукции карельской березы в природные местообитания за счет использования растительного материала местного происхождения (в случае реставрации популяций) или переноса его из других популяций (в случае репатриации). Кроме того, важная роль в сохранении и воспроизводстве карельской березы отводится технологии клонального микроразмножения.

Ключевые слова: карельская береза, ресурсы карельской березы, генофонд, ареал карельской березы, интродукция, реинтродукция, лесные культуры, локальные популяции, клональное микроразмножение

Благодарности: Работа выполнена при поддержке научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования» и при финансовом обеспечении из средств федерального бюджета в рамках выполнения государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН – тема № 121061500082-2, Институт биологии КарНЦ РАН – тема № 0218-2019-0074, Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН).

Для цитирования: Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Реинтродукция карельской березы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 9–31. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-9-31>

Review article

Reintroduction of Curly Birch

Lidia V. Vetchinnikova^{1✉}, *Doctor of Biology, Assoc. Prof., Chief Research Scientist; ResearcherID: J-5665-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2091-905X>*

Alexander F. Titov^{2,3}, *Corresp. Member of RAS, Doctor of Biology, Prof., Chief Research Scientist; ResearcherID: A-6705-2014, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6880-2411>*

¹Forest Research Institute of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; vetchin@krc.karelia.ru[✉]

²Institute of Biology of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation

³Department of Multidisciplinary Scientific Research of Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; titov@krc.karelia.ru

Received on May 29, 2020 / Approved after reviewing on September 5, 2020 / Accepted on September 7, 2020

Abstract. The paper offers a systematic overview of the results of research regarding reintroduction of curly (Karelian) birch *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti published by Russian and foreign authors over the past few decades. We briefly outline the current situation with its resources and the key causes of their decline in the late 20th – early 21st centuries, such as mass-scope illegal logging, vanishing or substantial alteration of typical curly birch habitats, as well as some biological features (fragmented distribution, low competitive capacity, etc.). The main outcomes of the curly birch introduction activities in the areas lying far beyond its natural distribution (mainly to the south-east from it) are reported. It is shown that the experience of curly birch reintroduction in Russia is mostly based on planting of forests and establishment of specially protected areas. The results of curly birch reintroduction in Finland, Sweden, Norway, Germany, Belarus and other countries are



observed. Although reintroduction is not equally effective in all countries (its success depends on many factors), it has made and is making a significant contribution to the preservation and augmentation of the resources of this unique member of the European forest tree flora. Importantly, the curly birch from the reintroductions performed in different years and different edaphic and climatic conditions steadily retains its key biological features, such as figured grain and diversity of growth forms and trunk surface characteristics, which once again confirms the authors' previously expressed opinion that there are grounds for classifying the curly birch as a separate biological species. Proceeding from the analysis of the data amassed by now, it is suggested that the efficiency of curly birch reintroduction to its natural habitats can be promoted by mainly using the stocking material of local provenance (when restoring populations) or by transferring it from other populations (for repatriation cases). An important role in the preservation and reproduction of curly birch belongs to the micropropagation technique.

Keywords: curly birch, curly birch resources, gene pool, curly birch distribution, introduction, reintroduction, forest plantations, local populations, micropropagation

Acknowledgements: The research was supported by the World-class Scientific and Educational Center "Russian Arctic: New Materials, Technologies and Research Methods" and funded from the federal budget as part of the state assignment of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Forest Research Institute, KarRC RAS – Topic No. 121061500082-2; Institute of Biology, KarRC RAS – Topic No. 0218-2019-0074; Department of Multidisciplinary Scientific Research, KRC RAS).

For citation: Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Reintroduction of Curly Birch. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 9–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-9-31>

Древесные растения характеризуются широкой нормой реакции, высокой пластичностью и устойчивостью к неблагоприятным факторам внешней среды, благодаря чему занимают значительные по площади ареалы. Одним из исключений является карельская береза *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, обладающая уникальной и высокоценной узорчатой древесиной. Это дерево оказалось среди тех немногочисленных видов, которые имеют ограниченный и фрагментированный ареал. Как показывают исследования, в настоящее время в природных условиях в наибольшем количестве карельская береза растет в Белоруссии, где встречается почти повсеместно, хотя распределена по территории страны неравномерно [4, 36, 40]. В естественных условиях карельская береза также произрастает в России, Швеции, Финляндии, Польше, редко – в Норвегии, Эстонии и Словакии [12]. Однако приходится констатировать, что в последние 2–3 десятилетия практически на всей площади ареала численность популяций карельской березы и, соответственно, ее генофонд неуклонно сокращаются. Кроме того, постепенно исчезают или значительно изменяются типичные места обитания вида: земли, использовавшиеся в сельском хозяйстве, заброшенные пастбища и т. п. Наряду с другими причинами это становится дополнительным препятствием для естественного возобновления карельской березы, а в древостоях вызывает смену породного состава. В отдельных странах (Германия, Чехия, Дания, Латвия, Литва) к началу XXI в. она исчезла совсем [18]. В Республике Карелии, где сосредоточены основные ресурсы карельской березы нашей страны, только за последние 20–30 лет произошло сокращение численности вида почти на 2/3, и в настоящее время он является краснокнижным [27].

Возникла реальная угроза утраты этого высокоценного дерева, что существенно актуализирует вопрос о его воспроизводстве и восстановлении генофонда. Поэтому в целом ряде стран, включая Россию, где в природных условиях карельская береза встречается до сих пор или еще недавно произрастала, ведутся работы по ее реинтродукции, хотя пока их масштаб не очень значителен.

Цель исследования – обобщение и систематизация результатов реинтродукционных работ, осуществляемых на протяжении нескольких десятилетий для воспроизводства ресурсов карельской березы и обогащения генофонда ее природных популяций.

Современное состояние ресурсов карельской березы и причины их сокращения. Карельская береза способна расти в разных природно-климатических условиях: протяженность ее ареала с севера на юг составляет около 2,3 тыс. км, от территории Финляндии (62° с. ш.) до Словакии (48° с. ш.), с запада на восток – около 2,5 тыс. км, от Норвегии (10° в. д.) до России (40° в. д.). Ареал карельской березы в значительной степени совпадает с ареалами березы повислой *Betula pendula* Roth и березы пушистой *B. pubescens* Ehrh. Однако карельская береза заметно отличается от этих двух видов по требованиям к условиям произрастания, прежде всего своим отношением к световому фактору, предпочитая хорошо освещенные места. Она, как и береза повислая, является светлюбивой породой, но, в отличие от последней, не способна образовывать леса, расти в древостоях с высокой плотностью и конкурировать с березой повислой в местах контакта с ней, часто оказываясь в подчиненном ярусе. В лесных ценозах карельская береза занимает довольно узкую и специфическую экологическую нишу. Она встречается в мелко- и редколесьях (~68–70 %), на опушках леса и по берегам водоемов (~15 %), а также на нелесных землях – сенокосных угодьях или заброшенных пастбищах – (~10 %) и возле жилых строений.

В Швеции и Белоруссии отдельные деревья и их небольшие группы до сих пор можно найти в придорожных полосах (~8 %). В Эстонии вид отмечен на альварных почвах, каменных грядках и в других местах вдоль побережья Балтийского моря. В Латвии и Белоруссии карельскую березу обнаруживали в дюнах и на откосах, где почвы преимущественно песчаные. В целом вид произрастает в растительных сообществах с пониженной напряженностью конкурентных отношений и/или в той или иной мере подверженных антропогенному воздействию [13, 36, 70, 71].

На всем протяжении ареала распределение деревьев карельской березы носит неравномерный характер: в одних популяциях их количество исчисляется единицами, а в других – несколькими десятками, иногда сотнями. В Белоруссии свыше 15 тыс. деревьев карельской березы (табл. 1). По общей оценке они представляют собой наибольшую часть всех мировых ресурсов этого вида в природных популяциях к началу XXI в.

В России природные популяции карельской березы сохранились только на территории Республики Карелии (около 1,5 тыс. деревьев). Единичные представители вида обнаружены в Псковской, Смоленской и Владимирской областях. В других регионах страны, где это дерево произрастало ранее, в настоящее время оно или реинтродуцировано (в Ленинградской и Костромской областях), или уже отсутствует (Ярославская, Калужская, Брянская и Новгородская области) [12].

Таблица 1

Насаждения с участием карельской березы на территории Республики Беларусь

Table 1

Curly birch plantations in the territory of the Republic of Belarus

Область	Площадь, га*	Количество деревьев, % от общего числа**	Запас, м ³ ***
Брестская	42,3	0,8	~1500
Витебская	563,9	24,7	~3000
Гомельская	19,7	1,3	<100
Гродненская	9,8	4,6	~2000
Минская	45,7	13,0	~6000
Могилевская	13,7	55,6	>2500
<i>Всего</i>	695,1	100	~15100

Примечание: Данные по: * – [4]; ** – [40]; *** – [38].

В связи с ограниченной численностью и локальным характером произрастания карельская береза считается редким растением. В соответствии с Красной книгой Российской Федерации [28] и Красным списком Международного союза охраны природы [53] карельская береза отнесена к категории 2/EN, т. е. к числу исчезающих, находящихся в опасном состоянии видов [25–27]. Данная категория присваивается таксонам, которые имеют высокую степень риска исчезновения в природе в ближайшее время, что определяется наблюдаемым (или предполагаемым) сокращением численности популяций или особей минимум на 50 % за последние (или в ближайшие) 10 лет либо площадью ареала менее 500 км². Добавим, что карельская береза неизменно входит в перечень видов деревьев и кустарников, заготовка древесины которых в России запрещена.

Основные причины резкого сокращения численности популяций карельской березы известны [9, 14]. К ним прежде всего относятся выборочные рубки (в том числе незаконные), проводившиеся в течение длительного времени ради высокоценной древесины карельской березы, активно использовавшейся человеком. В результате таких рубок исчезли наиболее ценные генотипы, а многие природные популяции оказались представленными главным образом деревьями со слабо выраженной узорчатой текстурой древесины. Кроме того, в естественных условиях возраст многих деревьев карельской березы составляет 80 лет и более, т. е. особи находятся на поздней генеративной и даже постгенеративной стадиях развития и характеризуются резким снижением репродуктивной функции. Этим объясняется то, что в границах всего ареала жизнеспособный подрост (виргинильные и молодые генеративные растения), практически отсутствует.

Отрицательное влияние на формирование и развитие карельской березы оказывают и колебания природно-климатических факторов, делаая ее плодоношение крайне нестабильным: высокоурожайные годы чередуются с годами средне- и малоурожайными (особенно заметно это проявилось в начале XXI в.). Дополнительно процессу сокращения численности карельской березы в природных условиях способствовали некоторые ее биологические особенности [11, 13, 14, 19].

Интродукция карельской березы: основные итоги. Первые работы по интродукции карельской березы проведены около полувека назад, почти одновременно с началом ее систематического изучения. К настоящему времени зона интродукции вида занимает обширную территорию – от Финляндии на севере до Узбекистана и Киргизии на юге – и, расширяясь преимущественно в юго-восточном направлении, далеко выходит за пределы ареала [16].

Анализ результатов интродукции показывает, что практически во всех природно-климатических условиях – от северной тайги с умеренно холодным климатом до лесостепи с резко континентальным – карельская береза сохраняет ритмы ростовых процессов и особенности фенологического развития, присущие ей в естественных местообитаниях, хотя прохождение отдельных фенофаз может сдвигаться на более ранние или более поздние сроки в южных и северных широтах соответственно. Карельская береза способна расти в широком диапазоне почвенных условий – от песчаных и суглинистых до подзолистых и черноземных – и даже при отсутствии нормального почвенного покрова или на явно нарушенных землях, например на рекультивированных [4, 30, 41, 42].

Однако эффективность интродукции карельской березы не является очень высокой. Очевидно, это обусловлено биологическими особенностями вида, а также климатическими условиями конкретных пунктов интродукции. В ходе планирования работ по переносу карельской березы за пределы ареала важно предварительно осуществлять всестороннюю оценку природно-климатических условий намеченного места интродукции. Наиболее подходящими для дерева становятся условия бореальных и смешанных лесов. Дополнительными критериями могут служить состав лесообразующих пород и сопутствующих им видов в новом пункте интродукции с учетом того, что карельская береза, в отличие от некоторых других древесных пород, предпочитает хорошо освещенные местообитания; результаты применения «дистанционного метода», который дает представление об условно допустимом расстоянии от границы ареала вида или места происхождения исходного растительного материала до пункта интродукции [16, 17].

Наиболее полно признаки и свойства карельской березы сохраняются, как и у других растений, в вегетативном потомстве, полученном, например, в результате клонального микроразмножения *in vitro*. Использование при интродукции семенного материала также вполне допустимо, но только он должен быть получен контролируемым опылением с участием отцовских и материнских деревьев, имеющих явно выраженные косвенные признаки карельской березы.

При создании искусственных насаждений карельской березы необходимо обращать внимание на густоту посадки – при высокой плотности «узорчатость» в древесине проявляется слабо или не проявляется вообще – и географическое происхождение растительного материала. Например, в условиях Московской области сеянцы карельской березы белорусского происхождения растут в 2–2,5 раза быстрее, чем выращенные в те же сроки посева из семян, собранных в Карелии. В Свердловской области у сеянцев белорусского происхождения в зимний период было отмечено повреждение низкой температурой верхушечных побегов, а растения из Карелии опережали в прохождении осенних фенофаз растения из Латвии [31, с. 89–98]. Результат интродукции карельской березы зависит также от своевременности и регулярности агротехнических мероприятий и лесоводственных уходов.

Отечественный опыт реинтродукции карельской березы. Для России первым опытом реинтродукции карельской березы стали работы по ее размножению семенами, начатые Н.О. Соколовым в 1931 г. на территории заповедника «Кивач» в Карелии [18]. В результате уже в 1934 г. здесь были созданы лесные культуры карельской березы на территории Петрозаводского, а в 1939 г. – Заонежского лесхозов [43]. Первоначально эти работы осуществлялись путем мероприятий, способствующих естественному возобновлению карельской березы, или посевом ее семян. Дальнейшее развитие лесные культуры получили после организации специализированных хозяйств в Заонежском лесхозе, Спасогубском и Рыборецком лесничествах [15, 18, 21]. В целом к 1986 г. в Карелии общая площадь культур карельской березы составила более 5 тыс. га в 14 лесхозах (рис. 1).

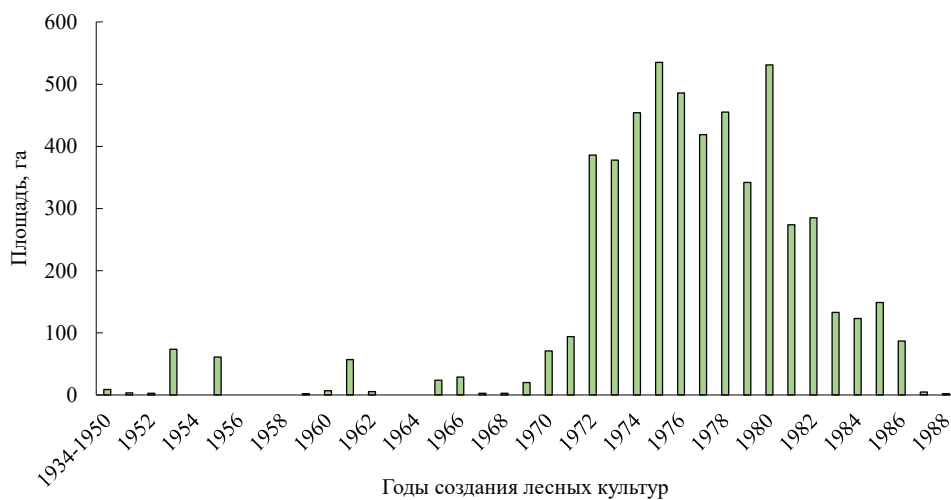


Рис. 1. Годы создания и площадь лесных культур карельской березы в Республике Карелии

Fig. 1. Years of planting and area of curly birch plantations in the Republic of Karelia

Однако следует признать, что лесные культуры, созданные в основном в 1970–80-е гг. на больших площадях из семян от свободного опыления случайно выбранных деревьев, с высокой нормой посева в питомниках и другими способами, не оправдали связанные с ними ожидания. Позднее, в период с 1987 по 2020 г. площадь новых участков карельской березы в Карелии увеличилась не более чем на 50 га.

Для охраны и воспроизводства карельской березы в 1984 г. в Карелии были организованы 4 ботанических заказника общей площадью 40,4 га [6, 7, 10, 32]. Важное значение для реинтродукции популяций карельской березы в регионе имел отбор плюсовых (лучших) деревьев, обладающих наиболее выраженными внешними признаками узорчатой древесины. В дальнейшем такие деревья использовались в работах по контролируемому опылению, что значительно увеличило количество узорчатых особей в потомстве [22, 29, 45]. В результате применения семенного и вегетативного потомства плюсовых деревьев карельской березы

здесь созданы лесосеменные плантации общей площадью 42,1 га и архив клонов из 40 генотипов на площади 0,4 га, полученных путем прививки.

К сожалению, в 1990-е гг., когда резко возрос объем незаконных рубок, были утрачены многие плюсовые деревья, значительно пострадали ботанические заказники и искусственно созданные насаждения [9, 10, 45]. Часть культур из-за отсутствия средств на проведение регулярных уходов оказалась по своему состоянию на среднем или низком уровне, поскольку, с одной стороны, произошло их зарастание быстрорастущими лиственными породами (ивой, осиной или другими видами березы), а с другой стороны, вследствие появления высокой травянистой растительности саженцы повреждались мышевидными грызунами и другими мелкими млекопитающими, которые для питания часто использовали молодую кору у основания стволов. Кроме того, большинство природных популяций карельской березы, а также более 300 га искусственно созданных популяций по возрастной структуре стали спелыми или перестойными.

К началу XXI в. карельская береза в Карелии оказалась под угрозой исчезновения, а проблема сохранения ее генофонда и воспроизводства ресурсов приобрела особую остроту. Чтобы исправить ситуацию, по инициативе ученых была разработана региональная целевая программа, утвержденная в 2008 г. республиканским Законодательным Собранием. Однако начало выполнения программы совпало с мировым и российским финансовыми кризисами, что остановило ее уже на старте. К тому же оставался нерешенным вопрос о предоставлении для реализации программы земель, находящихся в федеральной собственности, земель запаса и о переводе сельскохозяйственных земель, на которых предполагалось создание лесных культур плантационного типа, в состав лесного фонда.

Несмотря на это, исследования в соответствии с целями и задачами программы продолжались. Одним из важных итогов стало создание *in vitro* коллекции клонов карельской березы, выращенной вегетативным путем благодаря разработке (с получением патентов) и использованию технологии клонального микроразмножения [8, 33, 34]. В настоящее время коллекция включает более 100 генотипов карельской березы разного географического происхождения из России (Республика Карелия, Ленинградская и Смоленская области), Белоруссии, Дании, Норвегии, Финляндии и Швеции. С 2016 г. коллекция вошла в научно-технологическую инфраструктуру Российской Федерации [23]. Среди клонов, составляющих данную коллекцию, есть и генотипы, которые уже отсутствуют в природе.

В последние годы разработаны новые технологические решения для массового и круглогодичного выращивания посадочного материала карельской березы с гарантированным сохранением ее уникальных признаков и свойств [35]. Результаты не имеют мировых аналогов и являются важной предпосылкой сохранения этого уникального вида, его интродукции и реинтродукции. Посадочный материал, полученный путем клонального микроразмножения, стал основой для создания коллекции клонов *in situ* на территории агробиологической станции ФИЦ «Карельский научный центр РАН», где в настоящее время произрастает несколько сотен растений редких представителей семейства *Betulaceae* (рис. 2).

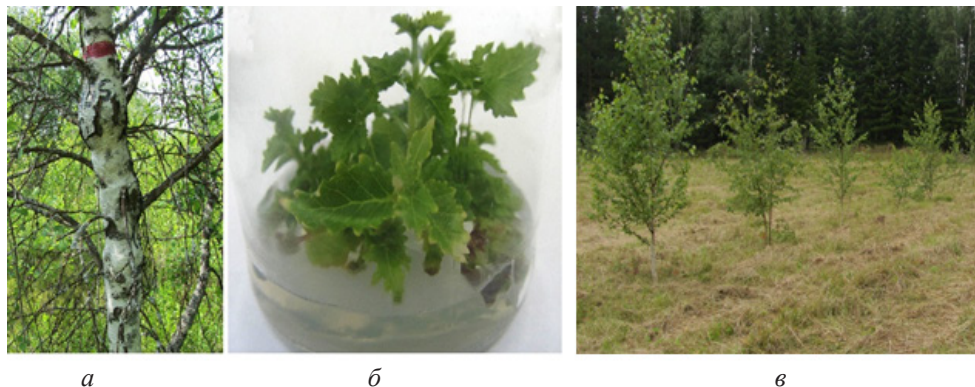


Рис. 2. Плюсовое дерево карельской березы № 155 в природных условиях (а), в культуре *in vitro* (б) и его вегетативное потомство, выращенное путем клонального микроразмножения на опытных участках Института леса КарНЦ РАН на Агробиологической станции КарНЦ РАН (в)

Fig. 2. Curly birch plus tree No. 155 in natural conditions (a), cultured *in vitro* (b), and its vegetative progeny grown by micropropagation at the test plots of the Forest Research Institute KarRC RAS at the Agrobiological Research Station (v)

Применение современных биотехнологий существенно расширяет возможности воспроизводства и реинтродукции уникальных генотипов карельской березы, а метод клонального микроразмножения позволяет поддерживать их морфо- и органогенез круглогодично и сохранять в течение нескольких десятилетий. У вегетативного размножения есть и другие преимущества. Оно, во-первых, обеспечивает полное воспроизводство генотипов лучших деревьев с присущими им признаками узорчатой текстуры древесины, во-вторых, способствует ускоренному выращиванию посадочного материала и, в-третьих, позволяет сравнительно быстро увеличить численность популяций.

Однако при организации лесосеменных плантаций (или насаждений) карельской березы переход на клоновое размножение с целью сохранения генофонда может привести к сужению генетического разнообразия. Это можно предупредить, если в качестве посадочного материала будет отобрано не менее 10, а лучше 30–50 клонов. В случае создания лесосырьевых плантаций вполне допустимо использование ограниченного числа клонов, даже одного наиболее продуктивного.

В России работы по реинтродукции карельской березы проводились, кроме Карелии, только в Ленинградской и Костромской областях. Так, мероприятия по реинтродукции карельской березы в Ленинградской области были осуществлены на территории Охтинского учебно-опытного лесхоза (Всеволожский район) в 1949 и 1957 гг. [39]. К настоящему времени заложенные там насаждения карельской березы находятся в удовлетворительном состоянии, но лишь отдельные деревья имеют косвенные признаки узорчатой текстуры древесины. Основные ресурсы вида (не менее 1,5 тыс. деревьев) в Ленинградской области сосредоточены на Гатчинской и Тихвинской лесосеменных плантациях (рис. 3), а также в окрестностях пос. Шапки Тосненского района. У большинства экземпляров здесь зафиксированы косвенные признаки узорчатой древесины в виде выпуклостей и/или неровностей на поверхности ствола. Высота деревьев

составляет от 15 до 20 м, диаметр ствола – от 30 до 45 см (табл. 2). Эти насаждения, созданные преимущественно в конце 1970-х гг., находятся в хорошем состоянии, но требуют принятия мер по их сохранению и плана дальнейшего использования.



Рис. 3. Реинтродукция карельской березы в Ленинградской области. Окрестности г. Тихвина

Fig. 3. Curly birch reintroduction in the Leningrad Region. The vicinity of Tikhvin

Таблица 2

Искусственно созданные насаждения карельской березы в Ленинградской области

Table 2

Artificially regenerated curly birch plantations in the Leningrad region

Местонахождение	Годы создания	Площадь, га	Характеристика деревьев (максимальные значения)	
			Высота, м	Диаметр, см
Охтинский учебно-опытный лесхоз	1949	1,26	15	19
	1957	0,33	10,5	27
Гатчинская плантация	1974–1976	~5	16	45
Тихвинская плантация	1979	4,50	17,5	32,5
У пос. Шапки, Тосненский район	–	–	21	34

В природных условиях Костромской области (Судиславский, Костромской и Нерехтский районы) карельская береза обнаружена в начале 1960-х гг. в виде одиночных деревьев или небольших групп по 4–5 экземпляров возрастом 30–45 лет [1]. В частности, на территории Судиславского лесничества в местечке Климцово, которое получило статус памятника природы, было отобрано 58 плюсовых деревьев карельской березы. Однако к настоящему времени само

насаждение и, соответственно, его статус в качестве особо охраняемой природной территории утрачены, а семенное потомство карельской березы сохранилось только в культурах, созданных на территории Костромской и Кировской областей [2]. К примеру, в Кировской области в полусибсовом потомстве (от свободного опыления) карельской березы 56 % особей характеризуются явно выраженными признаками узорчатой текстуры древесины, 34 % – слабо заметными и только 10 % оказались без признаков. Большинство деревьев, 53 %, имеют короткоствольную форму роста (высота – около 9 м, диаметр ствола – до 12 см), 35 % – высокоствольную (высота – около 14 м, диаметр ствола – до 15 см) и 12 % – кустообразную (высота – до 7 м, диаметр ствола – до 8 см) [37].

Зарубежный опыт реинтродукции карельской березы. Первые в мире плантации карельской березы были заложены в 1920 г. в Финляндии руководителем лесной школы В. Аалтоненом на опытной территории Весияко (Vesijako) Института леса Финляндии в коммуне Падасйоки (Padasjoki). Географическое положение территории – 61°25' с. ш. 29°19' в. д., 100 км к востоку от г. Тампере (Tampere) [50, 56, 66]. Положительные результаты этих опытов стимулировали расширение исследований, которые с 1923 г. приобрели здесь систематический характер.

Позднее, в 1930-е гг., работы по разведению и реинтродукции карельской березы были организованы по инициативе О. Хейкинхеймо [51, 61, 66] и продолжены не только в государственных организациях, но и в частном секторе, однако в целом не приобрели крупного масштаба [50]. Основные мероприятия осуществлены в южной части Финляндии на естественных для карельской березы широтах (61°48' с. ш. 29°19' в. д.), на территории общей площадью около 20 га, а также на севере Финляндии (66–68° с. ш. 24–29° в. д.) – около 30 га.

К началу 1960-х гг. только в разных районах Лапландии интродуцировано более 35 тыс. саженцев [48]. Однако значительная часть из них позднее была утрачена и работы по реинтродукции и интродукции приостановились. Основной причиной этого стали повреждения, наносимые растениям лосями, зайцами, мышевидными грызунами и даже кротами [69].

Начиная с 1980-х гг. наиболее активные работы по реинтродукции карельской березы вновь проводились в Финляндии [46]. При этом основное внимание было уделено разработке способов получения и выращивания посадочного материала. В частности, эффективным оказалось получение семян карельской березы из селекционно улучшенных семян, которые собирались главным образом с деревьев из крупногабаритных теплиц [55]. Отдельные плюсовые деревья карельской березы в качестве исходного материала для разведения были выбраны в естественных популяциях еще в конце 1940-х гг. Количество генотипов в одной теплице, как правило, варьировало от 33 до 50 [72].

Несмотря на высокую себестоимость теплиц, их использование оказалось экономически оправданным, поскольку в них выращивались исключительно деревья карельской березы и отсутствовали другие опылители (например, береза повислая), поэтому количество особей с узорчатой древесиной достигало в потомстве 90 % и более. Кроме того, цветение и образование семян карельской березы в теплицах чаще всего начиналось уже в возрасте 2–3 лет. Урожайность семян составляла в среднем 20 кг на 1000 м² в год. Для ежегодного посева использовали 6–7 кг семян. 1 кг давал около 500–700 тыс. семян, из которых

90 % выращивались с закрытой корневой системой. В 90-е гг. в Финляндии впервые была разработана и использована технология клонального микроразмножения карельской березы [63, 67]. В последние десятилетия здесь в культуре *in vitro* ведется разведение нескольких клонов вида уже в коммерческих целях [56, 64].

Густота посадки при создании плантаций карельской березы в Финляндии в большинстве случаев составляла от 1200 до 2000 семян на 1 га, или 400–800 растений-регенерантов (растения, полученные в культуре тканей) на 1 га. Для обеспечения нормального развития растений в течение по меньшей мере 5–7 лет после посадки в культурах ведутся агротехнические и регулярные лесоводственные уходы: скашивание травянистой растительности, удаление поросли, обрезка сучьев. При необходимости используются гербициды с обязательным соблюдением ограничений по срокам их применения и концентрациям. Растения, которые не проявляют косвенных признаков формирования узорчатой древесины (что наблюдается у особей, полученных из семенного посадочного материала), из насаждения удаляются. Эти работы ведутся в культурах возрастом от 10 до 13 лет при высоте деревьев 7–9 м.

В результате в 1990-е гг. общая площадь посадок карельской березы в Финляндии существенно возросла, увеличиваясь ежегодно на 150–250 га [57], а в период с 2000 по 2006 г. – в среднем уже на 330 га [50]. Согласно официальной статистике, с 1984 г. по настоящее время общая площадь территории, используемой для реинтродукции карельской березы в Финляндии, составляет более 5 тыс. га. Причем преобладают деревья с мелкобугорчатым типом поверхности ствола (табл. 3). Однако в последние годы наметилась тенденция сокращения объемов посадки [50].

Таблица 3

Соотношение деревьев карельской березы по типу поверхности ствола при реинтродукции в Финляндии в зависимости от возраста [по 66, 68]

Table 3

The ratio of curly birch trees by trunk surface type during reintroduction in Finland depending on age [according to 66, 68]

Местонахождение	Возраст, лет	Узорчатые деревья, шт.	Тип поверхности ствола, % от общего числа узорчатых деревьев		
			м/буг.	ш/ут.	ребр.
Пункахарью (Punkaharju), 35 км на юго-восток от г. Савонлинна (Savonlinna)	42–43	106	80,3	8,1	11,6
Керимяки (Kerimäki), 20 км на восток от г. Савонлинна	35	245	66,4	11,8	21,8
Хаухо (Hauho), 30 км к северу от г. Хямеэнлинна (Hämeenlinna)	35	246	88,6	5,9	5,5
Весияко (Vesijako), 60 км на северо-восток от г. Хямеэнлинна	52	48	87,5	10,4	2,1
<i>Среднее</i>	–	–	75,5	8,5	14,6

Примечание: м/буг. – мелкобугорчатый, ш/ут. – шаровидноутолщенный, ребр. – ребристый.

В Швеции первые опыты по выращиванию карельской березы с целью ее реинтродукции относятся к началу 1940-х гг. [54]. Использовали саженцы, полученные из семян от свободного и контролируемого опыления. Через 5 лет обнаружили проявление косвенных признаков примерно у 20 % растений, еще через 2 года количество таких деревьев увеличилось вдвое. В настоящее время в Швеции карельская береза выращивается преимущественно в частном секторе как в южной, так и в центральной частях страны [18, 47, 58]. Посадочный материал, в основном саженцы, как правило, приобретается в Финляндии.

С начала 2000-х гг. в Швеции для интродукции и реинтродукции начали использовать растения карельской березы, полученные путем клонального микроразмножения. Например, по инициативе ученого-лесоведа У. Мартинссона на территории 10 коммун – от Карлсруны (Хольмшё (Holmsjö), 56° с. ш. 15° в. д.) на юге страны до Каликса (65° с. ш. 23° в. д.) на севере – созданы насаждения карельской березы, включающие 25 генотипов разного географического происхождения: из Швеции, Финляндии и России (Карелии). К 10–12 годам высота растений варьировала от 2 до 6 м при диаметре ствола 3–13 см. При этом у большинства клонов независимо от местонахождения проявились основные свойства и признаки карельской березы (форма роста, выпуклости и утолщения на поверхности ствола), характерные для исходных материнских особей. Различия наблюдались лишь по скорости роста: при интродукции в северную часть страны деревья росли медленнее, чем при реинтродукции в южную, что закономерно, поскольку удаленность нового места произрастания в долготном направлении составила почти 2 тыс. км.

В Норвегии начало работ по реинтродукции карельской березы относится к 1943 г., когда в восточной части страны, в провинции Бускеруд, было посажено 3670 саженцев финского происхождения (из заповедника Ауланко (Aulanko), окрестности г. Хямеэнлинна) и 416 норвежского (из местечка вблизи оз. Раннсфьорден (Randsfjorden), округ Иннландет). Весной 1944 г. высажено еще около 1 тыс. растений норвежского происхождения (регион Сёрлланн (Sørlandet), Южная Норвегия). В конце века для реинтродукции карельской березы в этой стране также начали использовать культуру тканей. На территории питомников в Реиерсёла (Reiersøl), 58° с. ш. 8° в. д., Дёммесмуене (Dømmesmoen), 58° с. ш. 8° в. д., и Линдала (Lyngdal), 58° с. ш. 7° в. д, расположенных на юге Норвегии, было организовано выращивание *in vitro* 10 генотипов карельской березы с характерными признаками узорчатой текстуры в древесине [52].

Ситуация с реинтродукцией карельской березы в Германии оказалась следующей. Согласно данным Шольца [70], карельская береза встречалась в восточной части страны, но к середине 1950-х гг. сохранилось всего 2 дерева. Одно из них было обнаружено вблизи местечка Крёхерн (Stöchern), а другое, с которого были собраны семена для размножения вида, – в районе г. Вальдзиверсдорф (Waldsieversdorf). Однако первые опыты по реинтродукции карельской березы с использованием семян не увенчались успехом, поскольку из-за свободного опыления количество особей с узорчатой древесиной в потомстве было единичным. В результате опытов по контролируемому опылению с участием деревьев карельской березы финского происхождения были получены особи, унаследовавшие узорчатую текстуру, однако большинство растений было низкорослыми, а следовательно, неперспективными для производства (в дальнейшем) шпона.

Селекционная оценка семенного потомства позволила выбрать дерево, которое в дальнейшем было использовано при разработке технологии клонального микроразмножения [49, 59, 62]. Полученное потомство (клон GB) стало основой для создания опытного участка вблизи г. Хельбра (Helbra). Косвенные признаки наличия узорчатой текстуры в древесине растений проявились через 10 лет после посадки на постоянное место. На 30-й год диаметр основания ствола составил 47 см. По итогам проведенных испытаний клон GB получил регистрационный номер (№ 123804020334) и был передан в качестве исходного для размножения в коммерческих целях [62].

Работы по реинтродукции карельской березы проводились и в других странах Европы. Например, в Польше опытные культуры семенного происхождения карельской березы были созданы в конце 1960-х гг. на территории экспериментального лесничества Академии наук Польши «Звезинец» [60]. В Словакии в 1982–1983 гг. осуществлены опыты по контролируемому опылению карельской березы местного происхождения и на базе учебного лесхоза Зволненского технического университета созданы опытные культуры [65]. В результате получено потомство, в котором количество узорчатых особей достигло 75 %. В Эстонии карельскую березу выращивали в 70-е гг. XX в. В начале XXI в. внимание к ней еще более усилилось. К примеру, только в 2005 г. здесь, преимущественно в западной части страны, было создано 29 плантаций площадью от 0,05 до 53 га [71].

В начале 90-х гг. прошлого века произведены первые работы по выращиванию карельской березы в Дании. При этом саженцы покупались преимущественно в Финляндии, редко – в Швеции. Отличительной особенностью датских культур карельской березы является то, что во многих случаях ее высаживают вместе с сопутствующими породами. При этом предпочтение отдается видам, которые не могут конкурировать с ней по высоте, например лещине обыкновенной *Corylus avellana* L. или малине обыкновенной *Rubus idaeus* L. Иногда в культурах карельской березы выращивают широко известные датские рождественские ели, или пихту Нордманна *Abies nordmanniana* (Steven) Spach [18].

В конце XX–начале XXI вв. активизировались работы по реинтродукции карельской березы в Белоруссии. Первые опыты были проведены в 1987–1988 гг. на территории Корневской экспериментальной базы (53°21' с. ш. 31°06' в. д.) Института леса Национальной академии наук Белоруссии (г. Гомель) и Мозырского опытного лесхоза. Площади опытных участков – около 5 и 1 га соответственно.

К 10 годам развития узорчатые формы составили около 30 %, а к 20 – более 40 %. По форме роста в первое десятилетие преобладали высокоствольные деревья, по мере развития число узорчатых особей с короткоствольной формой роста заметно увеличилось. Сравнительный анализ показал, что в первое десятилетие интенсивность как апикального, так и радиального роста была превосходящей у высокоствольных форм карельской березы по сравнению с короткоствольными. У обеих форм относительная величина радиального прироста оказалась в 1,3 и 1,5 раза больше, чем прирост в высоту. При относительно равных высотах диаметр ствола у короткоствольных форм превосшел этот показатель у высокоствольных.

В последние годы реинтродукция карельской березы на территории Белоруссии ведется в Брестской, Витебской, Гомельской, Гродненской и Могилевской областях. Общая площадь участков, занятых этим видом, уже составила более 40 га [40].

Вклад реинтродукции в сохранение и увеличение ресурсов карельской березы. Анализ литературных данных и собственные наблюдения показывают, что реинтродукция карельской березы наиболее активно проводилась на территории России (Республика Карелия) и Финляндии, а также некоторых других европейских государств. Благодаря этой деятельности в Карелии удалось приостановить сокращение численности карельской березы и сохранить ее ресурсы, несмотря на негативные последствия, например, антропогенного воздействия: прежде всего выборочных рубок, зачастую носящих неконтролируемый и незаконный характер, агротехнических мероприятий, таких как обработка территорий ядохимикатами и др., – или отсутствие определенных знаний и технологий, необходимых для успешных организации и проведения работ по реинтродукции этого уникального вида [5, 20, 24 и др.].

Важным достижением в решении вопроса сохранения и воспроизводства ресурсов карельской березы путем реинтродукции является разработка и внедрение новых технологий, в первую очередь клонального микроразмножения на основе культуры апикальной меристемы вегетативных побегов, минуя этап каллусообразования. Эти технологии впервые применены в Финляндии в середине 1980-х гг. [67], а в России – в начале 1990-х гг. [3, 18, 44]. Использование данной технологии обеспечивает массовое производство качественного посадочного материала карельской березы с сохранением в потомстве признаков узорчатой текстуры древесины. Однако необходимо иметь в виду, что переход на клоновое размножение может привести к сужению генетического разнообразия, чего можно избежать за счет увеличения числа клонов в насаждениях. При семенном размножении число деревьев желательнее увеличить до 100 и более в целях создания насаждения, более полно отражающего генетическое разнообразие вида.

Важнейшими источниками исходного материала для пополнения коллекций клонов в культуре тканей, проведения контролируемого опыления и получения семян могут служить особо охраняемые природные территории, созданные с участием карельской березы; природные популяции, сохранившиеся в нашей стране (в Карелии) и в Белоруссии; вновь созданные объекты в Финляндии и живые коллекции клонов *in vitro* и *in situ* [14, 32, 40].

Заключение

Обобщение и систематизация результатов исследований, направленных на изучение ресурсов карельской березы, показали, что ее природные популяции в пределах ареала (за исключением Белоруссии) характеризуются крайне невысокой численностью. Пример Республики Карелии, где ресурсы данного вида в естественных условиях являются наибольшими не только в России, но и в Северной Европе, отчетливо демонстрирует, что сохранение этого уникального вида только за счет создания особо охраняемых природных территорий, включения в Красную книгу и введения запрета на рубку невозможно. В число наи-

более эффективных методов сохранения и воспроизводства карельской березы входят реинтродукция вида в природные местообитания (*in situ*) и сохранение его в культуре (*ex situ*). В природных условиях реинтродукция может осуществляться путем реставрации, или восстановления/пополнения существующей, но исчезающей популяции местным материалом; а также репатриации, или возрождения популяции вида в местообитаниях, где он произрастал ранее, за счет его переноса из других популяций.

Создание локальных популяций карельской березы целесообразно проводить в природных биотопах, максимально близких по условиям, особенно по уровню освещенности, к тем, где вид встречался ранее или произрастает до сих пор, но находится на грани исчезновения. При этом важно использовать посадочный материал, полученный вегетативным способом (включая клональное микроразмножение) и/или из семян от контролируемого опыления с участием материнских и отцовских деревьев, имеющих хорошо выраженные косвенные признаки узорчатой текстуры древесины. Необходимо учитывать своеобразие и уникальность биологических признаков и свойств карельской березы, особенности генетической структуры популяций, современное состояние ресурсов вида. Опыт интродукционной работы с карельской березой также может оказаться полезным при ее реинтродукции.

Для успешного разведения карельской березы требуется создание специализированных хозяйств. Их эффективность будет зависеть главным образом от качества посадочного материала и регулярности агротехнических мероприятий и лесоводственных уходов. Кроме того, при создании искусственных насаждений карельской березы важно обращать внимание на густоту посадки и географическое происхождение растительного материала.

Положительным примером реинтродукции карельской березы является опыт финских специалистов. В Финляндии создание искусственных насаждений этого вида, включая его интродукцию в северные регионы страны, началось еще в 1920-е гг. и продолжалось до начала 1960-х гг. Затем работы были временно приостановлены. Однако позднее, в период с 1984 по 2006 г., в стране осуществлена масштабная реинтродукция карельской березы. В результате общая площадь искусственных насаждений, составленных данным видом, превысила 5 тыс. га. Не случайно именно Финляндия до сих пор остается основным экспортером ценной древесины этого дерева на мировом рынке. Большим спросом пользуются также семена и саженцы карельской березы финского происхождения.

Для сохранения карельской березы в культуре (*ex situ*) следует шире использовать клональное микроразмножение. Оно позволяет получать растения карельской березы с гарантированными признаками узорчатой текстуры древесины и сохранять растительный материал, поддерживая его в стерильных условиях в течение нескольких десятилетий, создавая коллекцию генотипов долгосрочного хранения. С помощью данной технологии можно сравнительно быстро увеличить численность популяций и расширить возможности возобновления вида вегетативным путем. Широкое применение современных биотехнологий переводит реинтродукцию на новый уровень, а следовательно, качественно улучшает культуру ведения лесного хозяйства.

Таким образом, осуществление реинтродукции карельской березы в природные местообитания за счет формирования локальных популяций (*in situ*) на

основе их реставрации, а при необходимости и их репатриации, а также сохранение ее в культуре (*ex situ*), включая создание коллекций клонов или банка генотипов *in vitro*, повысит эффективность работ по сохранению генофонда и воспроизводству ресурсов карельской березы. Опыт также показывает, получение устойчивых популяций (с достаточной численностью, чтобы в будущем они могли обеспечить свое самовоспроизводство) является сложной задачей, решение которой потребует внедрения долгосрочных программ и больших финансовых ресурсов, что посылно далеко не каждому региону, но вполне возможно в рамках целевой или одной из федеральных программ. Данные трудности могут быть преодолены лишь при активном участии государства, т. к. требуется не только выделение значительных средств, но и подготовка квалифицированных кадров, разработка и принятие ряда нормативно-правовых актов, информационная поддержка со стороны средств массовой информации и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Багаев С.Н. Карельская и капокорешковая береза в лесах Костромской области // Лесн. хоз-во. 1963. № 6. С. 20–22.

Bagayev S.N. Karelian and Burr-Root Birch in the Forests of the Kostroma Region. *Lesnoye khozyaystvo*, 1963, no. 6, pp. 20–22. (In Russ.).

2. Багаев С.С. Испытание потомств географических популяций березы карельской в Кировской области // Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды / ред. кол.: Л.Л. Новицкая, Н.Н. Николаева, Л.Л. Веселкова. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2011. С. 21–24.

Bagayev S.S. Test of Posterities of Geographical Populations of Karelian Birch in the Kirov Region. *Structural and Functional Deviations from Normal Growth and Development of Plants under the Influence of Environmental Factors*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2011, pp. 21–24. (In Russ.).

3. Байбурина Р.К. Микроклональное размножение взрослых гибридов березы карельской в культуре тканей // Раст. ресурсы. 1998. Т. 34, № 2. С. 9–22.

Baiburina R.K. Micropropagation of Adult Hybrids of Curly Birch in Tissue Culture. *Rastitelnye Resursy*, 1998, vol. 34, no. 2, pp. 9–22. (In Russ.).

4. Барсукова Т.Л. Береза карельская в Белоруссии // Интенсификация лесного хоз-ва в Белорусской ССР. М.: ВНИИЛМ, 1987. С. 142–149.

Barsukova T.L. Karelian Birch in Belarus. *Intensification of Forestry in the Byelorussian SSR*. Moscow, VNIILM Publ., 1987, pp. 142–149. (In Russ.).

5. Беднова О.В. Реинтродукция, репатриация, реставрация... и урбанизация // Природа. 2014. № 10. С. 27–35.

Bednova O.V. Reintroduction, Repatriation, Restoration... and Urbanization. *Priroda*, 2014, no. 10, pp. 27–35. (In Russ.).

6. Белоусова Н.А. Развитие охраняемого природного фонда Карелии и его современное состояние: препр. докл. Петрозаводск: Кар. фил. АН СССР, 1987. 52 с.

Belousova N.A. *Development of the Protected Natural Fund of Karelia and Its Current State*: Preprint of the Report. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 1987. 52 p. (In Russ.).

7. Белоусова Н.А. Лесные и ботанические заказники Карелии // Охраняемые природные территории и памятники природы Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992. С. 71–81.

Belousova N.A. Forest and Botanical Reserves of Karelia. *Protected Natural Territories and Natural Monuments of Karelia*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 1992, pp. 71–81. (In Russ.).

8. Ветчинникова Л.В. Карельская береза и другие редкие представители рода *Betula* L. М.: Наука, 2005. 269 с.

Vetchinnikova L.V. *Karelian Birch and Other Rare Representatives of the Genus Betula* L. Moscow, Nauka Publ., 2005. 269 p. (In Russ.).

9. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Роль особо охраняемых природных территорий в сохранении генофонда карельской березы // Тр. КарНЦ РАН. Сер.: Экологич. исследования. 2018. № 10. С. 3–11.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. The Role of Protected Areas in the Conservation of the Curly Birch Gene Pool. *Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences. Ecological Studies Series*, 2018, no. 10, pp. 3–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eco912>

10. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Карельская береза в заказниках Республики Карелия: история, современное состояние и проблемы // Ботан. журн. 2018. Т. 103, № 2. С. 256–265.

Vetchinnikova L.V., Titov A. F. Karelian Birch in Sanctuaries in the Republic of Karelia: History, Current State, Problems. *Botanicheskii Zhurnal*, 2018, vol. 103, no. 2, pp. 256–265. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0006813618020096>

11. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Карельская береза – уникальный биологический объект // Успехи современной биологии. 2019. Т. 139, № 5. С. 419–433. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0042132419050107>

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. The Karelian Birch – a Unique Biological Object. *Uspekhi sovremennoi biologii* = Biology Bulletin Reviews, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 102–114. (In Eng.). <https://doi.org/10.1134/S2079086420020085>

12. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. О границах ареала карельской березы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 9–21.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Update on the Boundaries of the Curly Birch Range. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 6, pp. 9–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-9-21>

13. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Особенности структуры популяций карельской березы // Успехи современной биологии. 2020. Т. 140, № 6. С. 601–615. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0042132420050087>

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Specific Characteristics of Curly Birch Population Structure. *Uspekhi sovremennoi biologii* = Biology Bulletin Reviews, 2021, vol. 10, no. 4, pp. 102–114. (In Eng.). <https://doi.org/10.1134/S2079086421040095>

14. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Современное состояние ресурсов *Betula pendula* var. *carelica* (Betulaceae) // Раст. ресурсы. 2020. Т. 56, вып. 1. С. 16–33.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Current Status of *Betula pendula* var. *carelica* (Betulaceae) Resources. *Rastitelnye Resursy*, 2020, vol. 56, iss. 1, pp. 16–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033994620010082>

15. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Карельская береза: важнейшие результаты и перспективы исследований: моногр. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 243 с.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. *Curly Birch: Major Research Results and Prospects for Future Research*: Monograph. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2021. 243 p. (In Russ.).

16. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Интродукция карельской березы // Успехи современной биологии. 2021. Т. 141, № 3. С. 296–309.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Introduction of the Curly Birch. *Uspekhi sovremennoi biologii* = Biology Bulletin Reviews, 2021, vol. 141, no. 3, pp. 296–309. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0042132421030108>

17. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Оценка перспектив интродукции карельской березы // Тр. КарНЦ РАН. Сер.: Эксперим. биология. 2021. № 3. С. 21–35.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Assessment of Curly Birch Introduction Prospects. *Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences. Experimental Biology Series*, 2021, no. 3, pp. 21–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb1367>

18. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Кузнецова Т.Ю. Карельская береза: биологические особенности, динамика ресурсов и воспроизводство. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 312 с.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Kuznetsova T.Yu. *Curly Birch: Biological Characteristics, Resource Dynamics, and Reproduction*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2013. 312 p. (In Russ.).

19. Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Топчиева Л.В. Изучение генетического разнообразия и дифференциации северных и южной популяций карельской березы // Генетика. 2021. Т. 57, № 4. С. 412–419. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0016675821040147>

Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Topchieva L.V. A Study of the Genetic Diversity and Differentiation of Northern and Southern Curly Birch Populations. *Genetika = Russian Journal of Genetics*, 2021, vol. 57, iss. 4, pp. 416–422. (In Eng.). <https://doi.org/10.1134/S1022795421040141>

20. Горбунов Ю.Н., Дзыбов Д.С., Кузьмин З.Е., Смирнов И.А. Методические рекомендации по реинтродукции редких и исчезающих видов растений (для ботанических садов). Тула: Гриф и К, 2008. 56 с.

Gorbunov Yu.N., Dzybov D.S., Kuz'min Z.E., Smirnov I.A. *Guidelines for Reintroduction of Rare and Endangered Plant Species (for Botanical Gardens)*. Tula, Grif and K Publ., 2008. 56 p. (In Russ.).

21. Евдокимов А.П. Биология и культура карельской березы. Л.: ЛГУ, 1989. 228 с. Evdokimov A.P. *Biology and Crop of Curly Birch*. Leningrad, LSU Publ., 1989. 228 p. (In Russ.).

22. Ермаков В.И. Механизмы адаптации березы к условиям Севера. Л.: Наука, 1986. 144 с.

Ermakov V.I. *Mechanisms of Birch Adaptation to the North Conditions*. Leningrad, Nauka Publ., 1986. 144 p. (In Russ.).

23. Коллекция *in vitro* клонов редких растений семейства *Betulaceae* // Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации: центры коллективного пользования научным оборудованием и уникальные научные установки. Режим доступа: <https://ckp-rf.ru/usu/465691/> (дата обращения: 15.03.22).

In vitro Collection of Rare Plant Clones of *Betulaceae* Family. *Scientific and Technological Infrastructure of the Russian Federation: Centers of Collective Use of Scientific Equipment and Unique Scientific Installations*. (In Russ.).

24. Коровин С.Е., Кузьмин З.Е. К вопросу о понятиях и терминологии в интродукции растений // Бюл. Глав. ботан. сада. 1997. Вып. 175. С. 3–11.

Korovin S.E., Kuzmin Z.E. On Concepts and Terminology in Plant Introduction. *Bulletin of the Main Botanical Garden*, 1997, iss. 175, pp. 3–11. (In Russ.).

25. Красная книга Владимирской области. Владимир: Транзит-ИКС, 2010. 400 с. *The Red Data Book of the Vladimir Region*. Vladimir, Tranzit-IKS Publ., 2010. 400 p. (In Russ.).

26. Красная книга Республики Карелия. Петрозаводск: Карелия, 2007. 368 с. *The Red Data Book of the Republic of Karelia*. Petrozavodsk, Kareliya Publ., 2007. 368 p. (In Russ.).

27. Красная книга Республики Карелия. Белгород: Константа, 2020. 448 с.

The Red Data Book of the Republic of Karelia. Belgorod, Konstanta Publ., 2020. 448 p. (In Russ.).

28. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2008. 855 с.

The Red Data Book of the Russian Federation (Plants and Fungi). Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2008. 855 p. (In Russ.).

29. Любавская А.Я. Карельская береза. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 158 с.

Lyubavskaya A.Ya. *Karelian Birch*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 158 p. (In Russ.).

30. Любавский Д.В. Опыт выращивания карельской березы на рекультивируемых землях Щелковского учебно-опытного лесхоза // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2006. № 5. С. 100–104.

Lubavski D.V. Experience of Growing Karelian Birch on Recultivate Soils. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2006, no. 5, pp. 100–104. (In Russ.).

31. Махнев А.К. Интродукция карельской березы на Среднем Урале // Интродукция и акклиматизация декоративных растений / отв. ред. С.А. Мамаев, З.Д. Зайцева. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982. С. 30–35.

Makhnev A.K. Introduction of Karelian Birch in the Middle Urals, *Introduction and Acclimatization of Ornamental Plants*. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR Publ., 1982, pp. 30–35. (In Russ.).

32. Особо охраняемые природные территории Республики Карелия. Петрозаводск, 2017. 432 с.

Specially Protected Natural Territories of the Republic of Karelia. Petrozavodsk, 2017, 432 p. (In Russ.).

33. Патент 2627194 С1 РФ, МПК А01Н 4/00(2006.01), А01Н 5/00(2006.01). Способ клонального микроразмножения растений семейства *Betulaceae*: № 2016127313: заявл. 06.07.2016: опубл. 03.08.2017. / Л.В. Ветчинникова, Т.Ю. Кузнецова.

Vetchinnikova L.V., Kuznetsova T.Yu. *Method for Clonal Micro-Reproduction of Betulaceae Family Plants*. Patent RF no. RU 2627194 C1, 2017. (In Russ.).

34. Патент 2650754 С1 РФ, МПК А01Н 4/00(2006.01), А01Н 5/00(2006.01). Способ получения микропобегов растений семейства *Betulaceae*: № 2016140800: заявл. 17.10.2016: опубл. 17.04.2018 / Л.В. Ветчинникова, Т.Ю. Кузнецова, Н.Е. Петрова, О.С. Серебрякова, А.И. Степанова.

Vetchinnikova L.V., Kuznetsova T.Yu., Petrova N.E., Serebryakova O.S., Stepanova A.I. *Method for Producing Micro Bine of Plants of the Betulaceae Family*. Patent RF no. RU 2650754 C1, 2018. (In Russ.).

35. Патент 2756074 С1 РФ, МПК А01Н 5/00(2006.01). Способ ускоренного выращивания посадочного материала древесных растений семейства *Betulaceae* на основе клонирования *in vitro*: № 2020128604: заявл. 27.08.2020: опубл. 27.09.2021 / Л.В. Ветчинникова, О.С. Серебрякова.

Vetchinnikova L.V., Serebryakova O.S. *Method for Accelerated Cultivation of Planting Material of Woody Plants of Betulaceae Family Based on in vitro Cloning*. Patent RF no. RU 2756074 C1, 2021. (In Russ.).

36. Побирушко В.Ф. Распространение и изменчивость березы карельской в Беларуси // Ботаника: сб. науч. тр. Минск: Навука і тэхніка, 1992. Вып. 31. С. 31–39.

Pobirushko V.F. Distribution and Variability of Karelian Birch in Belarus. *Botany: Collection of Academic Papers*. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1992, iss. 31, pp. 31–39. (In Russ.).

37. Прохорова Е.В., Несветаев В.А. Опыт выращивания карельской березы на постоянном лесосеменном участке в Шабалинском лесхозе Кировской области // Вестник МГУЛ – Лесн. вестн. 2007. № 5. С. 90–96.

Prokhorova E.V., Nesvetaev V.A. Experience of Cultivation of the Karelian Birch on Constant Wood a Seed a Site in Shabalinskoy Timber Enterprise of the Kirov Area. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2007, no. 5, pp. 90–96. (In Russ.).

38. Пугачевский А.В. Карельская береза в Беларуси. Минск, 2008. 8 с.

Pugachevskiy A.V. *Karelian Birch in Belarus*. Minsk, 2008. 8 p. (In Russ.).

39. Редько Г.И., Брановицкий М.Л., Гусев С.П. Лесные культуры в Охтинском учебно-опытном лесхозе. Л.: ЛТА, 1991. 76 с.

Red'ko G.I., Branovitskiy M.L., Gusev S.P. *Forest Plantations in the Okhta Training and Experimental Forestry*. Leningrad, LTA Publ., 1991. 76 p. (In Russ.).

40. Сидор А.И., Ковалевич А.И., Луферова Н.С., Ревяко И.Д., Мальцева Л.В., Фомин Е.А. Карелка: Что имеем... // Лесн. и охотничье хоз-во. Минск: Мин-во лесн. хоз-ва Республики Беларусь, 2016. № 11. С. 18–23.

Sidor A.I., Kovalevich A.I., Lufarova N.S., Revyako I.D., Mal'tseva L.V., Fomin E.A. *Karelika: What We Have... Forestry and Hunting*. Minsk, Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, 2016, no. 11, pp. 18–23. (In Russ.).

41. Соколов А.И. Повышение ресурсного потенциала таежных лесов лесокультурным методом. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 178 с.

Sokolov A.I. *Increasing the Resource Potential of Taiga Forests Using the Forestry Method*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2016. 178 p. (In Russ.).

42. Соколов А.И., Федорев Н.Г., Кривенко Т.И., Лейбонен Е.Э., Новицкая Л.Л. Первичные этапы формирования биогеоценозов при разведении карельской березы на отвалах Костомукшского железорудного месторождения // Изв. СПбЛТА. 2010. № 191. С. 22–31.

Sokolov A.I., Fedorez N.G., Krivenko T.I., Leibonen E.E., Novitskaja L.L. Early Stages in the Formation of Biogeocenoses at Curly Birch Cultivation on the Spoil Banks of Kostomukshskoye Iron Ore Deposit. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii* = News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy, 2010, no. 191, pp. 22–31. (In Russ.).

43. Соколов Н.О. Карельская береза. Петрозаводск: Гос. изд-во Карело-Фин. ССР, Сортавал. кн. тип., 1950. 116 с.

Sokolov N.O. *Curly Birch*. Petrozavodsk, Gosudarstvennoye izdate'stvo Karelo-Finskoy SSR, Sortaval'skaya knizhnaya tipografiya, 1950. 116 p. (In Russ.).

44. Табачкая Т.М., Бутова Г.П., Машикина О.С. Объект № 95. Опытные плантационные культуры хозяйственно ценных форм карельской березы, созданные на основе технологии *in vitro* // Опытно-производственные селекционно-семеноводческие объекты НИИЛГиС. 2004. Т. 2. С. 171.

Tabatskaya T.M., Butova G.P., Mashkina O.S. Object No. 95. Experimental Plantations of Economically Valuable Forms of Karelian Birch Created on the Basis of *in vitro* Technology. *Experimental and Production Breeding and Seed-Growing Facilities of NIILGiS*. 2004, vol. 2, p. 171. (In Russ.).

45. Щурова М.Л. Состояние насаждений карельской березы в Республике Карелия // Структурные и функциональные отклонения от нормального роста и развития растений под воздействием факторов среды / ред. кол.: Л.Л. Новицкая, Н.Н. Николаева, Л.Л. Веселкова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 305–310.

Shurova M.L. State of Karelian Birch Plantations in the Republic of Karelia. *Structural and Functional Deviations from Normal Growth and Development of Plants Influenced by Environmental Factors*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2011, pp. 305–310. (In Russ.).

46. Consensus Document on the Biology of European White Birch (*Betula pendula* Roth). *Series on Harmonisation of Regulatory Oversight in Biotechnology*, No. 28. Paris, OECD, 2003. 45 p.
47. Emanuelsson J. *The Natural Distribution and Variation of Curly Birch (Betula pendula* Roth var. *carelica* (Merkl.) Sok.) in Sweden: Examensarbete i ämnet skogsskötsel. Umeå, Institutionen för skogsskötsel sveriges lantbruksuniversitet, 1999. 54 p. (In Swe.).
48. Etholén K. Kokemuksia visakoivun kasvatuksesta lapissa [Experimental Growing of Curly Birch in Finnish Lapland]. *Silva Fennica*, 1978, vol. 12, no. 4, pp. 264–274. (In Fin.). <https://doi.org/10.14214/sf.a14865>
49. Ewald D., Naujoks G., Piegert H. Performance and Wood Quality of *in vitro* Propagated Hybrid Curly Birch (*Betula pendula* × *Betula pendula* var. *carelica* Sok.) Clones. *Silva Genetica*, 2000, vol. 49, no. 2, pp. 98–101.
50. Hagqvist R., Mikkola A. *Visakoivun kasvatus ja käyttö*. Metsäkustannus Oy, 2008. 168 s. (In Fin.).
51. Heikinheimo O. Kokemuksia visakoivun kasvatuksesta. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, 1951, vol. 39(5), pp. 1–26. (In Fin.).
52. Hodnebrog T. *Valbjørk: produksjon på utvalgte kloner*. Ås, Forskningsparken, 1996. 3 p. (In Nor.).
53. *IUCN Red List Categories and Criteria*. Version 3.1. Switzerland, IUCN, 2012. 33 p.
54. Johnsson H. Avkommor av masurbjörk. *Svenska Skogsvårdsföreningens Tidskrift*, 1951, Bd. 49, Nr. 1, S. 34–45. (In Swe.).
55. Kleinschmit J. Konsequenzen aus Birkenzüchtung für die forstliche Praxis. *Forst und Holz*, 2002, Jg. 57, Nr. 15/16, S. 470–475. (In Ger.).
56. Kosonen M., Leikola M., Hagqvist R., Mikkola A., Väitalo H. *Visakoivu = Curly Birch*. Metsälehti Kustannus, 2004. 208 p. (In Fin.; In Eng.).
57. Martinsson O. Odling av masurbjörk – en utvecklade nisch för svenskt skogsbruk. *Fakta Skog*, 1995, nr. 11. 4 s. (In Swe.).
58. Martinsson O., Vetchinnikova L. Management, Reproduction and Protection of Karelian Birch in Fennoscandia. *Proceedings of the International Conference: Biological Basis of the Study, Management and Protection of Flora, Fauna and the Cover in Eastern Fennoscandia*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 1999, pp. 64–65.
59. Matschke J., Ewald D., Bolland G., Schneck H. Möglichkeiten der beschleunigten Vermehrung von Braunmasebirken. *Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie*, 1987, Bd. 21, Nr. 1, S. 21–25. (In Ger.).
60. Mejnartowicz L. Genetyka. Red. S. Białobok. *Brzozy Betula L.* Warszawa–Poznań, Polska Akademia Nauk, 1979, s. 219–264. (In Pol.).
61. Mikkilä H. *Guide to the Montell Trail in the Punkaharju Experimental Area*. Helsinki, Finnish Forest Research Institute, 1992. 27 p.
62. Naujoks G., Schneck V., Dietrich E. 30 Jahre In-vitro-Vermehrung der Braunmasebirke. *AFZ-DerWald*, 2017, Bd. 5, S. 32–35. (In Ger.).
63. Niemistö P., Viherä-Aarnio A., Velling P., Heräjärvi H., Verkassalo E. *Koivun kasvatus ja käyttö*. Metsäkustannus Oy, 2008. 254 s. (In Fin.).
64. Nikkanen T., Velling P. *Metsäpuiden Erikoismuodot – koristeputa viherrakentamiseen*. Metsäkustannus Oy, 2011. 156 s. (In Fin.).
65. Paganová V. Analysis of Inheritance and Growth of Curly Birch Progenies from Controlled Hybridisation and Possibilities of their Utilisation for Timber Production in Agricultural Landscape. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 2004, vol. 40, no. 2, pp. 51–62. <https://doi.org/10.17221/3700-CJGPB>

66. Raulo J., Sirén G. Neljän visakoivikon päätehakkuun tuotos ja tuotto [Yield in Volume and Money of Final Cutting in Four Curly Birch Stands]. *Silva Fennica*, 1978, vol. 12, no. 4, pp. 245–252. (In Fin.). <https://doi.org/10.14214/sf.a14862>

67. Ryytänen L., Ryytänen M. Propagation of Adult Curly Birch Succeeds with Tissue Culture. *Silva Fennica*, 1986, vol. 20, no. 2, pp. 139–147. <https://doi.org/10.14214/sf.a15448>

68. Saarnio R. Viljeltyjen visakoivikoiden laatu ja kehitys Etelä-Suomessa. *Folia Forestalia*, 1976, no. 263, pp. 1–28. (In Fin.).

69. Sarvas R. Visakoivikon perustaminen ja hoito. *Metsätal Aikakauslehti*, 1966, vol. 83, no. 8, pp. 331–333. (In Fin.).

70. Scholz E. Das Verbreitungsgebiet der Braunmasebirke. *Archiv für Forstwesen*, 1963, Bd. 12, Nr. 12, S. 1243–1253. (In Ger.).

71. Sibul I., Habicht K.-L., Ploomi A. Curly Birch Stands and Cultivation Results in Estonia. *Structural and Functional Deviations from Normal Growth and Development of Plants under the Influence of Environmental Factors: Materials of the International Conference*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2011, pp. 310–313.

72. Velling V.P., Viherä-Aarnio A., Rautanen J. Züchtung und Anbau von Birke in Finland – eine Erfolgsstory? *Forst und Holz*, 2002, Jg. 57, Nr. 15/16, S. 459–465. (In Ger.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья
УДК 638.132:630*43(571.621)
DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-32-43

Характеристика медоносных угодий и их пожароопасность в Еврейской автономной области

Т.А. Рубцова, канд. биол. наук, доц.; ResearcherID: B-2049-2014,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7275-1864>

А.М. Зубарева[✉], канд. геогр. наук; ResearcherID: B-2019-2014,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7254-198X>

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, ул. Шолом-Алейхе-ма, д. 4, г. Биробиджан, Еврейская автономная область, Россия, 679016; ecolicarp@mail.ru, anna-doroshenko@yandex.ru[✉]

Поступила в редакцию 31.05.20 / Одобрена после рецензирования 06.09.20 / Принята к печати 10.09.20

Аннотация. Пчеловодство – важная отрасль экономики, поэтому нужно изучать факторы, которые влияют на ее состояние. Еврейская автономная область – один из ведущих медоносных районов Дальнего Востока. Главной породой, продуцирующей медовые ресурсы, здесь является липа. Лесные пожары оказывают существенное негативное влияние на ее произрастание. Цель исследования – выявление и изучение пригодных для развития пчеловодства лесов, в составе которых есть липа, в Еврейской автономной области и определение риска их возгорания. Объект исследования – леса с участием липы в Еврейской автономной области. Проведены полевые экспедиционные работы в период с 2003 по 2018 гг. Для анализа древостоев выполнено 287 геоботанических описаний пробных площадей. На основе авторской карты растительности Еврейской автономной области определены местонахождения лесов с участием липы, которые отнесены к 4 растительным выделам. Показано преобладание растительных сообществ с липой амурской над сообществами с липой маньчжурской. Отсутствие липы в подросте свидетельствует о возможных сукцессиях в данных лесах и исчезновении вида из древостоя в будущем. По данным Управления лесами правительства Еврейской автономной области и геоинформационной системы «Пожары», в регионе произошло 290 лесных пожаров, следствием которых стало появление 104 770 га выгоревшей площади. Наибольшая площадь горельников, 50 270 га, зарегистрирована в 2018 г. в черноберезово-дубовых лесах паркового типа, иногда с липой (*Tilia*), лиственницей (*Larix*), с серобородниково-разнотравным покровом и разнотравно-вейниковыми лугами в составе. Отмечается тенденция к снижению площади и ухудшению экологического состояния лесов, где произрастает липа, и, соответственно, к обеднению медоносной базы региона. В связи с этим липа нуждается в охране как на региональном, так и на федеральном уровнях. Леса, подверженные воздействию негативных природно-антропогенных факторов, приводящих к деградации древостоя, требуют постоянного мониторинга и оценки состояния для усовершенствования пчеловодства как отрасли. Результаты исследования могут использоваться для обоснования рекомендаций по охране липовых лесов и будут полезны ведомствам, занимающимся развитием пчеловодства в Еврейской автономной области.



Ключевые слова: липа амурская, липа маньчжурская, пчеловодство, сохранение липовых лесов, лесные пожары, Дальний Восток России, медоносная база Дальнего Востока России

Благодарности: Часть исследований выполнена на базе лаборатории региональных биоценологических исследований, лаборатории геологии и геоэкологии Института комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН.

Для цитирования: Рубцова Т.А., Зубарева А.М. Характеристика медоносных угодий и их пожароопасность в Еврейской автономной области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 32–43. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-32-43>

Original article

Characteristics of Melliferous Lands and Their Fire Hazard in the Jewish Autonomous Region

Tamara A. Rubtsova, Candidate of Biology, Assoc. Prof; ResearcherID: [B-2049-2014](https://orcid.org/0000-0001-7275-1864),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7275-1864>

Anna M. Zubareva[✉], Candidate of Geography; ResearcherID: [B-2019-2014](https://orcid.org/0000-0001-7254-198X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7254-198X>

Institute for Complex Analysis of Regional Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Sholem Aleichema, 4, Birobidzhan, Jewish Autonomous Region, 679016, Russian Federation; ecolicarp@mail.ru, anna-doroshenko@yandex.ru[✉]

Received on May 31, 2020 / Approved after reviewing on September 6, 2020 / Accepted on September 10, 2020

Abstract. Beekeeping is an essential economy branch. Therefore, it is so important to study the conditions that affect its state. The Jewish Autonomous Region (JAR) is one of the most important melliferous regions of the Far East. The main melliferous species here is the linden. Forest fires are a major negative factor in the growth of linden in the region under study. The research aims at identifying and studying forests, which include linden, suitable for the development of beekeeping in the JAR, and determining the risk of fire hazard in them. The research object is forests with linden in the JAR. Field expedition works were carried out in the period from 2003 to 2018. The review and analysis of the stands was carried out using 287 geobotanical descriptions of the sample plots. On the basis of the author's map of vegetation of the JAR, locations of forests with the presence of linden were determined. These forests were assigned to four vegetation units. The predominance of plant communities with Amur linden over those with Manchurian linden is shown. In 93 descriptions linden does not occur in the forest, which indicates a possible succession – gradual replacement of linden with other tree species, and complete extinction of linden from the stand in the future. According to the Forest Management Department of the JAR Government and the Geographic Information System “Fires”, 290 forest fires occurred in the region. There is information on 290 fires and 104,770 ha of disturbed area. The largest fire-affected area (50,270 ha) was recorded in 2018 in black birch-oak forests of park type, sometimes with linden (*Tilia*), larch (*Larix*), beard lichen-mixed herbs cover and mixed herbs reedgrass meadows. There is a trend towards a decrease in the area and deterioration of the ecological state of the linden forests, and, therefore, the depletion of the region's melliferous base. In this regard, the linden needs to be protected at both the regional and federal levels. Forests affected by negative natural-anthropogenic factors leading to stand degradation require continuous monitoring and



assessment of the state to improve beekeeping as an industry. The results of the study can be used to substantiate recommendations for the protection of linden forests and will be useful to the agencies involved in the development of beekeeping in the region.

Keywords: Amur linden, Manchurian linden, forests with Amur linden, beekeeping, conservation of linden forests, forest fires, Russian Far East, melliferous base of the Russian Far East

Acknowledgements: Part of the research was carried out at the Laboratory of Regional Biocoenotic Researches, Laboratory of Geology and Geoecology of the Institute for Complex Analysis of Regional Problems, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences.

For citation: Rubtsova T.A., Zubareva A.M. Characteristics of Melliferous Lands and Their Fire Hazard in the Jewish Autonomous Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 3, pp. 32–43. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-32-43>

Введение

На сегодняшний день остро стоит проблема изучения и использования природных ресурсов, включая биологические. Концепция устойчивого развития предполагает их неистощительное использование. К промыслам, отвечающим данным требованиям, можно отнести пчеловодство как вид хозяйственной деятельности, не только сохраняющий живую природу, но и обеспечивающий повышение продуктивности некоторых растительных сообществ. Значительное внимание уделяется вопросам пчеловодства, важной отрасли хозяйства, а также медоносной базе растений разных регионов земного шара [16, 18, 20]. Изучение медового потенциала конкретного региона необходимо для применения интенсивных технологий содержания пчелиных семей, что способствует рациональному использованию медовых ресурсов района. Кадастровая оценка медовых ресурсов позволяет охарактеризовать с экономической точки зрения производственный потенциал, спланировать перспективы и формы развития пчеловодства на данной территории [21].

Медовая продуктивность растений зависит как от экологического состояния окружающей среды, так и от погоды. Перспективность развития пчеловодства в регионе определяется комплексом условий: биоразнообразием медоносных растений, их количеством, распределением по территории, доступностью, наличием лимитирующих факторов, включая нелегальные заготовки леса, строительство дорог, лесные пожары [1, 10, 15, 19]. Юг Дальнего Востока России, особенно зона кедрово-широколиственных лесов, имеет хорошие природные условия для развития пчеловодства. Здесь в 70–80 гг. прошлого века производилось около 1/4 от всего объема меда, получаемого в стране. Еврейская автономная область (ЕАО) – один из самых медоносных районов Дальнего Востока. В регионе насчитывается более 250 видов растений-медоносов, из них около 70 – деревья и кустарники. Эффективность дальневосточного пчеловодства определяется большим количеством весенних и осенних нектаропродуцирующих растений и еще большим – летних, т. е. медоносы в регионе есть на протяжении всех сезонов года, кроме зимнего [7]. Источником товарного меда обычно являются липы, из которых наиболее распространенный вид – липа амурская (*Tilia amurensis* Rupr.), липа маньчжурская (*Tilia mandshurica* Rupr.) встречается гораздо реже. Липовый мед может составлять 90 % от товарного медосбора за сезон. Однако в последние десятилетия из-за экологических проблем в лесах (лесные пожары, нелегальные лесозаготовки липы) и плохой транспортной доступности,

связанной с ухудшением состояния дорог и прекращением функционирования государственных пчелосовхозов, в которых был необходимый транспорт, доля заготавливаемого меда в ЕАО уменьшилась на 40 %.

Дальневосточный регион России наиболее подвержен пирогенному воздействию. Среди всех регионов он занимает по данному критерию первое место: пожары, случившиеся здесь, и выгоревшая площадь составляют соответственно 30 и 73 % от общероссийских показателей [11]. В связи с этим изучение влияния пирологического фактора на распространение лесов с липой в составе актуально.

В некоторых странах липа охраняется. Например, липа амурская в Китае относится ко II охраняемому статусу на национальном уровне как вид, имеющий экологическое и экономическое значение [17]. Поступали предложения о внесении липы амурской в Красную книгу регионов юга Дальнего Востока. Особенно остро эта проблема стоит в Приморском крае. Реальной оперативной мерой спасения видов липы в крае, обоснований для безотлагательной необходимости чего достаточно, считает М.Н. Чипизубова [12], является внесение этого дерева в Перечень видов (пород) деревьев и кустарников, заготовка которых не допускается. До 2007 г. липа была запрещенной в рубку породой в районах развитого пчеловодства, к которым из числа российских дальневосточных территорий относятся Приморский край, значительная часть юга Хабаровского края и Еврейской автономной области. Автор акцентирует внимание на том, что нельзя откладывать и изучение древостоев с участием липы в целях разработки основ ведения хозяйства в таких лесах. Особое внимание следует обратить на вторичные древостои с липой, требующие ухода. Это позволит создать в ближайшем будущем новые очаги пчеловодства [12].

Сходные проблемы актуальны и для территории ЕАО. Среди многочисленных природных и антропогенных факторов, оказывающих влияние на состояние и динамику растительности, лесным пожарам отводится главенствующее место. На Дальнем Востоке России пожары входят в число ведущих факторов трансформации природных экосистем. Анализ данных Федеральной службы государственной статистики показал, что ЕАО занимает одну из лидирующих позиций в Дальневосточном федеральном округе по количеству и площади пожаров при пересчете на единицу территории [11]. Сведения о возникновении пожаров позволяют выявить факторы, способствующие появлению возгорания в лесу, степень влияния которых снижается в следующем ряду: неосторожное обращение населения с огнем, сельскохозяйственные палы, возгорания из-за функционирования предприятий и организаций. Основной причиной лесных пожаров является первый из названных факторов – в некоторые годы он обуславливает более 90 % возгораний.

Пожары уничтожают или угнетают леса, в том числе с участием липы – основного медоносного растения региона. Учитывая важность пчеловодства в ЕАО и наличие существующих проблем природопользования была поставлена цель исследования: выявить и изучить подходящие для развития пчеловодства леса с участием липы на территории ЕАО и оценить их горимость.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – леса с участием липы в ЕАО. В период 2003–2018 гг. проведены полевые экспедиционные работы, которые позволили выявить местонахождение таких лесов на территории региона и нанести их на карту

растительности ЕАО (масштаб – 1:500000). Выполнено 710 геоботанических описаний пробных площадей (ПП) размером 20×20 м. На каждой ПП велся учет ярусности: древостой, подрост, подлесок и травяной покров. Каждый из ярусов характеризовался в соответствии с классическими требованиями геоботанических описаний. Определяющим показателем выбрано проективное покрытие древостоя (%). Проведен анализ 287 ПП, на которых отмечены виды рода липа.

В целях исследования рисков, существующих для лесных сообществ, использовались сведения по учету лесных пожаров Управления лесами правительства ЕАО за 2011–2015 гг., 2017–2018 гг. (данные о пожарах за 2016 г. отсутствуют, так как возникли сложности с их первичной обработкой и вводом в геоинформационную систему «Пожары»). Площади, пройденные огнем, определялись с применением геоинформационной системы «Пожары», созданной в программе MapInfo Professional 6.0., в структуру которой входят авторские цифровые базы данных горельников и их инвентаризационная карта. Путем наложения инвентаризационной карты лесных пожаров на карту растительности ЕАО установлены численность и площади выгоревших территорий в исследуемых выделах растительности.

Использованы данные из литературных источников, архивов и современная информация региональной общественной организации «Союз пчеловодов Еврейской автономной области» с целью анализа состояния медоносной базы региона, а также развития пчеловодства в предыдущие годы и в настоящее время.

Результаты исследования и их обсуждение

ЕАО имеет хорошие природные условия для развития пчеловодства. Богатство и разнообразие медоносной флоры, относительная экономическая стабильность, гарантированный государственный рынок сбыта еще в недалеком прошлом определяли пчеловодство на данной территории как высокорентабельную отрасль.

Количество товарного меда на одну пчелосемью при благоприятных эколого-климатических условиях, способствующих нектаровыделению, в среднем составляло 40–60 кг. В 1979 г. было получено рекордное количество меда – 104 кг, что стало одним из лучших показателей за всю историю страны [13].

По данным региональной общественной организации «Союз пчеловодов Еврейской автономной области», сейчас в регионе насчитывается примерно до 400 пасек и 7500 пчелосемей (в 10 раз меньше пчелосемей, чем 30–40 лет назад). Количество товарного меда, полученного на одну пчелосемью, составляет в среднем 50 кг, так же как и в предыдущие годы. Пасеки размещены неравномерно. Большая часть из них приурочена к местам произрастания липы. Максимальное количество пасек расположено в более доступных местах вдоль дорог и рек – в долине р. Бира, в предгорьях хр. Чурки, Даур, Ульдуры, средней части хр. Малый Хинган, южной части Помпеевского хребта. Наиболее отдаленные местонахождения пасек – территории средней части Сутарского хребта в долине р. Биджан, верховья р. Сагды-Бира.

Липа амурская – главное медоносное растение Восточной Азии, наиболее распространенная и самая нектарообильная из 8 видов лип, произрастающих естественно. Видовое разнообразие лип представляет большой интерес для селекции ценных форм [4]. Средняя биологическая медопродуктивность 1 га чистых древостоев липы амурской, по данным В.К. Пельменева и П.М. Насенкова [5], составляла 750–1000 кг, а липы маньчжурской – больше 680–900 кг. Другой точки зрения придерживался В.В. Прогунков [6], он считал, что медопродуктивность липы маньчжурской в условно чистых насаждениях на юге Приморья колебалась в пределах 950–1450 кг/га. Исследования А.Г. Измоденова [3] показывают, приведенные показатели нуждаются в уточнении, так как необходимо учитывать количество деревьев, соотношение их диаметра и возраста: от этого зависит и число цветущих деревьев, и количество цветов на них.

Типичные древостои с участием липы характеризуются полнотой 0,8. В составе такого древостоя 20 % липовых деревьев имеют диаметр 30–40 см, что в переводе на чистые липняки составляет медовую продуктивность 250 кг/га. «Запас меда» в пересчете на условно чистые липняки округленно равен 5200 т в целом для ЕАО [3]. Из них доступны 1500–1600 т. Возможный медосбор составляет 1/3 от общего запаса меда, в то время как остальное количество необходимо на корм пчелам и другим насекомым. Таким образом, при рациональном размещении пасек и охвате всей доступной площади медосбор при обильном цветении липы можно довести до 1000 т и более.

Полевые исследования медоносных угодий с участием липы, в которых использовался метод описаний ПП, в различных растительных сообществах были выполнены Е.М. Яковлевой [13]. 5 ПП заложено вблизи пасек в 3 районах области: водораздел рек Кирга–Икура (смешанный многопородный широколиственный лес с преобладанием липы), Биробиджанский район; ключ Большой Кедровый (смешанный многопородный лес с преобладанием липы), Октябрьский район; р. Сагды-Бира (смешанный многопородный широколиственный лес с редколесьями), Облученский район; окрестности с. Радде (свежий дубняк с липой, кленом *Acer* и другими породами), Облученский район; р. Большие Сололи (горный кедровник), Облученский район. Проведенные исследования выявили, что доля участия липы в составе древостоя составляет от 10 до 50 % (обычные показатели для территории Дальнего Востока – 10–30 %). Наибольшая концентрация липы сосредоточена на ПП Большой Кедровый (49,8 %), ПП водораздела рек Кирга–Икура (33 %), ПП Большие Сололи (30 %). Средние показатели имеет ПП р. Сагды-Бира (14 %). ПП в окрестностях с. Радде характеризуется наименьшим показателем (8,8 %) [13].

В последующие годы при изучении растительности региона Т.А. Рубцовой и ее коллегами [2, 8, 9] с использованием метода описания ПП лесной растительности была разработана карта растительности ЕАО. Из 30 выделов в 4 отмечены липы амурская и маньчжурская – основные медоносы региона (рис. 1).

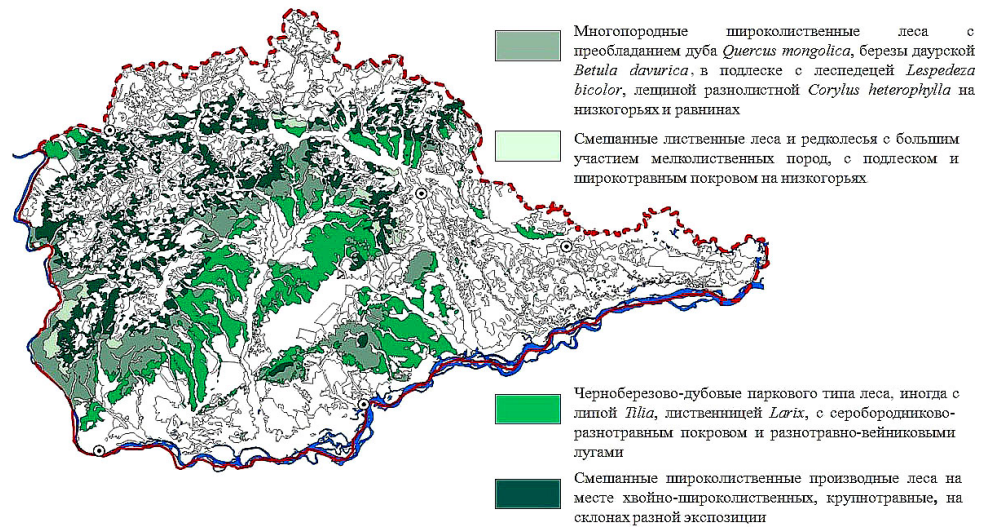


Рис. 1. Леса с липой амурской и липой маньчжурской на территории ЕАО

Fig. 1. Forests with Amur linden and Manchurian linden in in the JAR

В ЕАО липа входит в состав древостоя в кедрово-широколиственных и широколиственных долинных лесах как на равнинных территориях, так и в предгорьях и нижнем поясе гор. Такие леса занимают около 10–15 % лесопокрытой поверхности (более 100 тыс. га) и по большей части труднодоступны [7]. Преобладает липа амурская, а липа маньчжурская произрастает преимущественно в южной приамурской части региона, в низкогорьях Помпеевского и Хинганского хребтов, в горах-изолятах Среднеамурской низменности – Чурки, Ульдуры, Даур и др. Из описанных нами 710 ПП лесной растительности на 287 отмечены липы амурская и маньчжурская (278 ПП – только с липой амурской, 9 ПП – с липой маньчжурской и на 13 ПП выявлены оба вида).

112 ПП имеют проективное покрытие древостоя липы менее 10 %. Во многих лесах липы перестойные, нередко дуплистые, подверженные болезням. Однако выявлены леса с липой амурской, проективное покрытие которых составляет до 70 %, и с липой маньчжурской – до 95 %. Можно сказать, что это чистые липняки, хотя А.Г. Измоленов, считал, что «на Дальнем Востоке нет чистых липняков и совсем мало лесов, в которых преобладает липа. Если вы обнаружили массив, в составе которого 60–80 процентов липы, считайте, что он заслуживает включения в число охраняемых памятников природы» [4, с. 23].

На одной из ПП произрастает липа как маньчжурская (90 %), так и амурская (10 %), других видов деревьев здесь не выявлено. В подросте преобладает липа маньчжурская. В исследуемом регионе подобные липняки занимают очень небольшие площади, являются фрагментарными.

Анализ подроста липы амурской на 270 ПП размером 400 м² не вселяет надежду на сохранение продуктивных липовых насаждений в ближайшей перспективе, так как на 93 ПП липа в подросте отсутствует, всего одно растение липы в подросте зафиксировано на 95 ПП, от 2 до 10 особей отмечено на 82 ПП.

Лишь на 5 ПП выявлено более 10 растений липы в подросте. Фрагментарно отмечаются молодые особи липы в виде корневой поросли.

В лесах с проективным покрытием липы 1 % доминируют преимущественно лиственные виды: клен мелколистный (*Acer mono* Maxim.), дуб монгольский (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.), березы даурская (*Betula davurica* Pall.), ребристая (*B. costata* Trautv.) и плосколистная (*B. platyphylla* Sukacz.). Реже ведущей породой становятся ильм японский (*Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg.), ольха волосистая (*Alnus hirsuta* (Spach) Fisch. ex Rupr.). Иногда среди преобладающих деревьев встречаются хвойные виды: пихта белокорая (*Abies nephrolepis* (Trautv.) Maxim.), кедр корейский (*Pinus koraiensis* Siebold et Zucc.), лиственница Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.). Перечисленные виды относятся к различным экологическим группам (мезоксерофиты, гидромезофиты, мезофиты и др.) и, как следствие, формируют разнообразные растительные формации и ассоциации лесов.

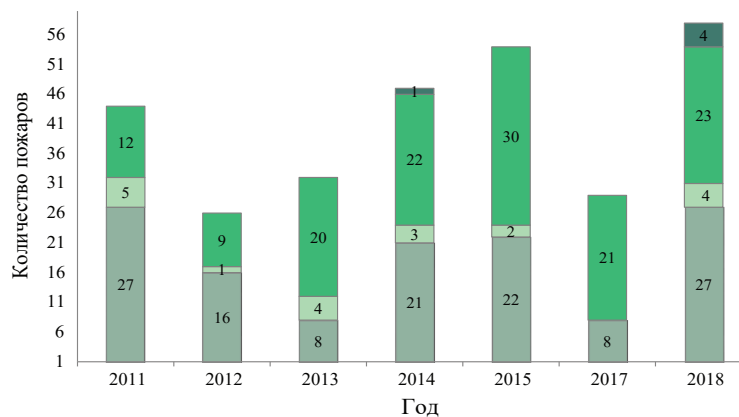
При максимальных значениях проективного покрытия древостоя липы (больше 50 %) отмечаются те же виды, только в меньшем количестве и с меньшим проективным покрытием. Нетипичными для этих сообществ являются маакия амурская (*Maackia amurensis* Rupr. et Maxim.), тополя Максимовича (*Populus maximowiczii* A. Henry) и дрожащий (*P. tremula* L.), ольха волосистая, которые отмечены на таких ПП единично.

Однако в последние десятилетия наблюдается отрицательная динамика лесов с участием липы, что реально ухудшает природную базу для развития пчеловодства в регионе [13, 14]. К основным причинам деградации липовых лесов можно отнести лесозаготовки, лесные пожары (низовые и верховые), распашку земель для сельскохозяйственных полей, дачных участков и т. д., развитие вторичных (производных) лесов после пожаров и лесозаготовок, разработку месторождений полезных ископаемых (Кимканно-Сутарский горно-обогатительный комбинат, ООО «Дальграфит», Савкинское месторождение брусита, месторождения марганца, гравия, россыпного золота и др.).

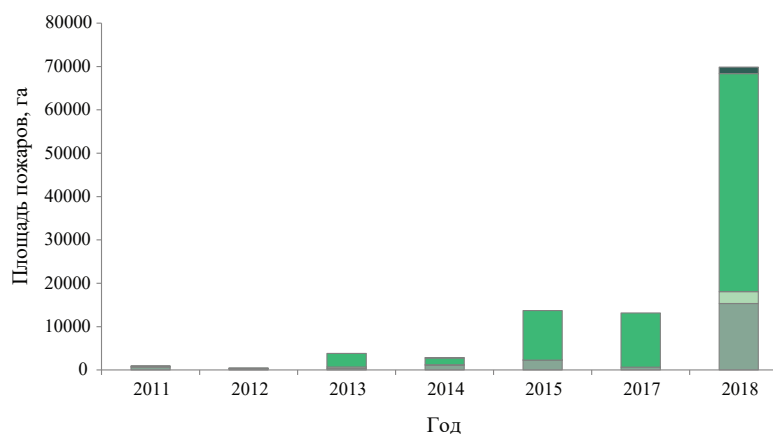
Лесные пожары – один из важных факторов, приводящих к сокращению, деградации и сукцессиям растительных выделов с участием липы. Влияние пожаров оценивается по количеству и площади горельников, а также по степени угнетения медоносной базы региона.

Анализ численности горельников показывает, что распространение пожаров происходило во всех формациях лесов с участием липы на территории ЕАО в исследуемый период. Общее количество пожаров составляет 290 (рис. 2, а). Наибольшее число возгораний (20 %) за исследуемый период отмечено в 2018 г.; наименьшее (9 %) – в 2012 г. В среднем в год за рассмотренный период возник 41 пожар.

В результате пожаров выгорели или деградировали 104 770 га липовых лесов. Наибольшая площадь, подвергшаяся действию пирогенного фактора, наблюдалась в 2018 г., наименьшая – в 2012 г., что составило соответственно 66 и 0,6 % от общей пострадавшей из-за огня территории в исследуемых растительных формациях (рис. 2, б). Средняя площадь одного возгорания – 361 га.



а



б

Рис. 2. Лесные пожары в липовых лесах в 2011–2015 гг., 2017–2018 гг.

Fig. 2. Forest fires in linden forests in 2011–2015, 2017–2018

В течение 7 лет в 4 выделах растительности с участием липы на территории ЕАО произошло значительное количество пожаров. В результате полностью или частично выгорели ценные леса, представляющие медоносную базу региона. Наиболее подвержены возгораниям были черноберезово-дубовые паркового типа леса, иногда с липой, лиственницей, с серобородниково-разнотравным покровом и разнотравно-вейниковыми лугами, расположенные преимущественно в равнинной части области и более доступные для развития пчеловодства. В этой формации пожаров в 27 раз больше, чем в формации с наименьшим количеством пожаров – в смешанных широколиственных производных лесах на месте хвойно-широколиственных, крупнотравных, на склонах разной экспозиции. Выгоревшие территории в самой уязвимой перед пожарами формации тоже наибольшие – в 52 раза выше по сравнению с площадями нарушенной огнем территории в лесах, где пожары оказали наименьшее воздействие.

Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что Еврейская автономная область является одним из важнейших дальневосточных регионов для развития традиционной отрасли сельского хозяйства – пчеловодства. Это обусловлено богатой медоносной базой как травянистых, так и древесных растений – всего 250 видов. Самые значимые из них – виды рода липа, прежде всего липы амурская и маньчжурская. В регионе они представлены в 4 растительных выделах в соответствии с картой растительности Еврейской автономной области. Липа амурская в древостое выявлена на всех описанных пробных площадях (278). Из них лишь на 13 она произрастает вместе с липой маньчжурской. На остальных 9 древостое состоит только из липы маньчжурской. Из 30 выделов растительности в 4 отмечены липы амурская и маньчжурская.

Большая часть исследованных лесов (202 пробные площади) имеет проективное покрытие липы 10 % и меньше. Во многих лесах липы перестойные, нередко дуплистые, подверженные болезням. Подрост липы на исследованных пробных площадях отмечен в незначительном количестве. На 32 % из них липа в подросте отсутствует, а на 34 % зафиксировано только одно растение. В связи с важностью этого вида для развития пчеловодства как высокоэкологического способа природопользования и учитывая современное состояние данных лесов, актуален вопрос об их рациональном использовании и восстановлении.

Пожары способствуют деградации липовых лесов. Это положение подкрепляется результатами анализа пирогенной обстановки на исследуемых территориях за последнее десятилетие. Выгорели или трансформировались 104 770 га липовых лесов. В наибольшей степени воздействию огня были подвержены расположенные преимущественно в равнинной части области чернопольно-дубовые паркового типа леса, иногда с липой, лиственницей, серобородниково-разнотравным покровом и разнотравно-вейниковыми лугами в составе. Отмечается тенденция к снижению площади и ухудшению экологического состояния лесов с участием липы, следовательно, и к обеднению медоносной базы региона. Это указывает на необходимость мероприятий, направленных на своевременное обнаружение и ликвидацию лесных пожаров.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что липа нуждается в охране как на региональном, так и на федеральном уровне. Лесонасаждения, подверженные воздействию негативных природно-антропогенных факторов, приводящих к деградации древостоя, требуют постоянного мониторинга состояния, что будет способствовать модернизации пчеловодства как отрасли.

Леса с участием липы являются особо ценными медопродуктивными сообществами, поэтому предпочтительно использовать их как медоносные угодья, которые могут выполнять важные экологические функции: природоохранные, средообразующие, средостабилизирующие, ресурсоформирующие. Это позволит обеспечить рациональное природопользование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Добровольский А.А., Богданова Л.С., Нешатаев В.Ю. Особенности липняков на территории Лисинского участкового лесничества Учебно-опытного лесничества // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 5. С. 21–34.
Dobrovol'skiy A.A., Bogdanova L.S., Neshataev V.Yu. Peculiarities of Lime Woods in the Lisino Forestry of the Training Forest District. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 5, pp. 21–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.5.21>
2. Зайцева Н.В., Рубцова Т.А. Классификация лесной растительности Еврейской автономной области // Региональные проблемы. 2008. № 9. С. 78–82.
Zaitseva N.V., Rubtsova T.A. The Wood Vegetation Classification for the Jewish Autonomous Region. *Regional'nye problemy* = Regional Problems, 2008, no. 9, pp. 78–82. (In Russ.).
3. Измоденов А.Г. Богатства кедрово-широколиственных лесов. М.: Лесн. пром-сть, 1972. 120 с.
Izmodenov A.G. *Abundance of Cedar Broadleaved Forests*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1972. 120 p. (In Russ.).
4. Измоденов А.Г. Лесная самобранка: мед, овощи и соки уссурийских лесов. Хабаровск: Кн. изд-во, 1989. 256 с.
Izmodenov A.G. *Forest Self-Replenishing: Honey, Vegetables and Juices of the Ussuri Forests*. Khabarovsk, Knizhnoe izdatel'stvo, 1989. 256 p. (In Russ.).
5. Пельменёв В.К., Насенков А.М. Пути повышения продуктивности пчеловодства. Хабаровск: Кн. изд-во, 1964. 182 с.
Pel'menev V.K., Nasenkov P.M. *Ways to Increase the Productivity of Beekeeping*. Khabarovsk, Knizhnoe izdatel'stvo, 1964. 182 p. (In Russ.).
6. Прогунков В.В. В мире медоносных пчел: моногр. Владивосток: ДВФУ, 1995. 272 с.
Progunkov V.V. *In the World of Honey Bees: Monograph*. Vladivostok, DVFU Publ., 1995. 272 p. (In Russ.).
7. Рубцова Т.А. Флора Еврейской автономной области. Хабаровск: Антар, 2017. 241 с.
Rubtsova T.A. *Flora of the Jewish Autonomous Region*. Khabarovsk, Antar Publ., 2017. 241 p. (In Russ.).
8. Рубцова Т.А., Гелунов А.Н. Сравнительная характеристика растительности и видового разнообразия сосудистых растений растительных формаций гор-изолятов Среднеамурской низменности // Региональные проблемы. 2015. Т. 18, № 2. С. 24–29.
Rubtsova T.A., Gelunov A.N. Comparative Characteristics of Vegetation and Species Diversity of Vascular Plants of Plant Formations of Isolate Mountains of the Middle Amur Lowland. *Regional'nye problemy* = Regional Problems, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 24–29. (In Russ.).
9. Рубцова Т.А., Фетисов Д.М., Гелунов А.Н. Распространение и видовое разнообразие хвойно-широколиственных лесов хребта Чурки (Среднеамурская низменность) // Региональные проблемы. 2013. Т. 16, № 1. С. 35–40.
Rubtsova T.A., Fetisov D.M., Gelunov A.N. Distribution and Species Diversity of Coniferous Broadleaved Forests of the Churki Ridge (Central Amur Lowland). *Regional'nye problemy* = Regional Problems, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 35–40. (In Russ.).
10. Самсонова И.Д. Оценка медоносных ресурсов на землях лесного фонда Ростовской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 1. С. 45–53.
Samsonova I.D. Evaluation of Nectariferous Resources on Forest Lands of the Rostov Region. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2015, no. 1, pp. 45–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.1.45>
11. Федеральная служба государственной статистики. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 16.03.22).
Federal State Statistics Service. (In Russ.).

12. Чипизубова М.Н. Липа в лесах Приморского края: проблема сохранения // Комаровские чтения. 2016. Вып. LXIV. С. 101–118.

Chipizubova M.N. Lime Trees (*Tilia* L.) in Forests of the Primorskii Krai: The Problem of Conservation. *Komarovskiye chteniya* = V.L. Komarov Memorial Lectures, 2016, iss. 64, pp. 101–118. (In Russ.).

13. Яковлева Е.М. Современное состояние, особенности и перспективы развития пчеловодства в ЕАО // Человеческое измерение в региональном развитии: тезисы V Междунар. симп. Биробиджан, 2000. С. 93–94.

Yakovleva E.M. Current State, Features and Prospects of Beekeeping Development in the JAO. *Human Dimension in Regional Development: Proceedings of the 5th International Symposium*. Birobidzhan, 2000, pp. 93–94. (In Russ.).

14. Яковлева Е.М. Оценка современного состояния медоносных угодий с участием липы на территории Еврейской автономной области // Проблемы устойчивого развития регионов в XXI веке: материалы VI междунар. симп. Биробиджан, 2002. С. 210–211.

Yakovleva E.M. Assessment of the Current State of Honey Lands Containing Linden in the Jewish Autonomous Region. *Issues of Sustainable Development of Regions in the 21st Century: Proceedings of the 6th VI International Symposium*. Birobidzhan, 2002, pp. 210–211. (In Russ.).

15. Akay A.E., Taş İ., Gencal B. Variation of Tree Diameters along Road Edges: The Case of Karacabey Linden Forest in Bursa, Turkey. *Forestist*, 2019, vol. 69, no. 2, pp. 81–86. <https://doi.org/10.26650/forestist.2019.18014>

16. Catania P., Vallone M. Application of a Precision Apiculture System to Monitor Honey Daily Production. *Sensors*, 2020, vol. 20, iss. 7. <https://doi.org/10.3390/s20072012>

17. Cui L., Mu L.-Q. Ectomycorrhizal Communities Associated with *Tilia amurensis* Trees in Natural Versus Urban Forests of Heilongjiang in Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 2016, vol. 27, no. 2, pp. 401–406. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0158-1>

18. Degirmenci A., Can Z., Boyraci G.M., Yildiz O., Asadov E., Kolayli S. Honeys from Some Different Regions of Azerbaijan: Bioactive Characteristics Based on Phenolic Profile and Antioxidant Activity. *Journal of Apicultural Research*, 2020, vol. 59, iss. 4, pp. 390–397. <https://doi.org/10.1080/00218839.2020.1726033>

19. Gencal B., Taş İ., Akay A.E. Spatiotemporal Change Detection of the Linden Forests in Bursa, Turkey. *European Journal of Forest Engineering*, 2018, vol. 4, iss. 2, pp. 50–55. <https://doi.org/10.33904/ejfe.495088>

20. Henry M., Rodet G. The Apiary Influence Range: A New Paradigm for Managing the Cohabitation of Honey Bees and Wild Bee Communities. *Acta Oecologia*, 2020, vol. 105, art. 103555. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2020.103555>

21. Khisamov R., Yanbaev Y., Yumaguzhin F., Farkhutdinov R., Ishbulatov M., Onuchin M., Mustafin R., Rakhmatullin Z., Talipov E. Nectariferous Potential and Cadastral Evaluation of Honey Resources of the Wildlife Altyin Solok Reserve Created for the Conservation and Reproduction of the Burzian Population of the *Apis Mellifera Mellifera* L. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2019, vol. 25, suppl. 2, pp. 140–149.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов


Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 630*584
DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-44-59

Дистанционный мониторинг государственных защитных лесных полос степной зоны европейской части России

И.Я. Чеплянский , канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAK-6002-2020](https://orcid.org/0000-0001-9076-8352),


ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9076-8352>

Т.Я. Турчин, д-р с.-х. наук; ResearcherID: [AAK-6019-2020](https://orcid.org/0000-0002-8789-9957),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8789-9957>

А.С. Ермолова, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAK-4647-2020](https://orcid.org/0000-0001-5850-2052),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5850-2052>

Филиал Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства – Южно-Европейская научно-исследовательская лесная опытная станция, ул. Сосновая, д. 59 в, ст. Вёшенская, Шолоховский р-н, Ростовская обл., 346270; donnilos@mail.ru , t_turchin64@mail.ru, ale-zagorodnjaja@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.05.20 / Одобрена после рецензирования 20.08.20 / Принята к печати 03.09.20

Аннотация. Государственные защитные лесные полосы являются не только одной из составляющих экологического каркаса малолесных степных территорий, но и уникальным объектом степного лесоразведения. Возрастные изменения и длительное отсутствие лесохозяйственного воздействия негативно сказались на санитарном состоянии насаждений государственных защитных лесных полос. Цель исследования – оценить современное состояние образующих их насаждений в разных почвенно-климатических условиях на территории степной зоны европейской части России. Объектом исследования стали насаждения прибрежных государственных защитных лесных полос «Воронеж – Ростов-на-Дону», «Белгород – р. Дон» и водораздельной «Волгоград – Элиста – Черкесск». Применен метод дистанционного зондирования Земли, целесообразность чего обусловлена значительной протяженностью объекта исследования и различиями его состояния в зависимости от почвенно-климатических условий. Выделено 5 лесохозяйственных районов на основных подтипах зональных почв: черноземах обыкновенных, черноземах южных и темно-каштановых почвах, каштановых, светло-каштановых с наличием солонцов и иногда солончаков почвах, а также на азональных песчаных почвах. На основе данных натурных обследований насаждений осуществлено дешифрирование космических снимков государственных защитных лесных полос с применением алгоритма обучения и спектральных индексов в программном комплексе ENVI 5.2. Установлено, сохранность государственных защитных лесных полос снижается по мере ужесточения лесорастительных условий от черноземов обыкновенных к светло-каштановым почвам с 92,3 до 36,5 %. На зональных почвах преобладают дубняки, ясенники, вязовники, на азональных – сосняки. С ухудшением лесорастительных условий доля дуба в насаждениях снижается, на смену ему приходит вяз, уменьшается полнота насаждений. В санитарном отношении также наиболее благополучны лесные полосы на черноземах, темно-каштановых и песчаных почвах. Для насаждений на каштановых и светло-каштановых почвах характерна нарастающая с увеличением возраста дигрессия или полный распад лесной

среды. Исследования позволяют выявить в пределах государственных защитных лесных полос насаждения, находящиеся в стадии депрессии или распада, и рекомендовать для них необходимое лесохозяйственное воздействие в целях сохранения и восстановления леса.

Ключевые слова: государственные защитные лесные полосы, искусственные насаждения, степная зона, почвенно-климатические условия, дешифрирование космических снимков, состояние защитных лесных полос

Для цитирования: Чеплянский И.Я., Турчин Т.Я., Ермолова А.С. Дистанционный мониторинг государственных защитных лесных полос степной зоны европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 44–59. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-44-59>

Original article

Remote Monitoring of State Forest Shelterbelts in the Steppe Zone of European Russia

Ivan Ya. Cheplyanskij[✉], Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAK-6002-2020](https://orcid.org/0000-0001-9076-8352),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9076-8352>

Taras Ya. Turchin, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [AAK-6019-2020](https://orcid.org/0000-0002-8789-9957),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8789-9957>

Alexandra S. Ermolova, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAK-4647-2020](https://orcid.org/0000-0001-5850-2052),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5850-2052>

All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry – South-European Research Forest Experiment Station, ul. Sosnovaya, 59 v, stanitsa Vyoshenskaya, Sholokhovskiy district, Rostov region, 346270, Russian Federation; donnilos@mail.ru[✉], t_turchin64@mail.ru, ale-zagorodnjaja@yandex.ru

Received on May 18, 2020 / Approved after reviewing on August 20, 2020 / Accepted on September 3, 2020

Abstract. State forest shelterbelts are not only one of the components of the ecological framework of sparsely forested steppe territories, but also represent a unique object of steppe afforestation. Age-related changes and a long-term absence of forestry impact negatively affected the sanitary condition of plantations of the state forest shelterbelts. The research is aimed at assessing the current state of the plantations that form the shelterbelts in different soil and climatic conditions in the steppe zone of the European part of Russia. The plantations of the coastal state forest shelterbelts “Voronezh – Rostov-on-Don”, “Belgorod – Don River” and watershed “Volograd – Elista – Cherkessk” were the research object. The expediency of using the method of remote sensing of the Earth is due to the significant extent and differences in the state of the research object in different soil and climatic conditions. An analysis of the natural conditions of the research region made it possible to determine the boundaries of 5 forestry regions on the main subtypes of zonal soils: ordinary chernozems, southern chernozems and dark chestnut soils; chestnut soils; light chestnut soils with the presence of solonetz and sometimes solonchak soils; and also on azonal sandy soils. Based on the data of our own field surveys of artificial plantations, the interpretation of space images of state forest shelterbelts was carried out using the learning algorithm and spectral indices in the ENVI 5.2 software package. As a result of interpretation, it was found that the safety of state forest shelterbelts decreases as forest conditions become more severe from ordinary chernozems to light chestnut soils from 92.3 to 36.5 %. Oak forests, ash forests, and elm forests predominate



in the species composition on zonal soils, and pine forests predominate on azonal soils. With the deterioration of forest site conditions, the share of oak in plantations decreases, it is replaced by elm, the density of plantations decreases. Forest strips on chernozems, dark chestnut and sandy soils are also the most prosperous in sanitary terms. Plantations growing on chestnut and light chestnut soils are characterized by digression increasing with age or complete decay of the forest environment. The conducted research allows to identify the location of plantations in the stage of degression or decay within the state forest shelterbelts, and to recommend for them the nature and volume of forestry impact for the conservation and restoration of the forest.

Keywords: state forest shelterbelts, artificial plantations, steppe zone, soil and climatic conditions, interpretation of satellite images, state of forest shelterbelts

For citation: Cheplyanskij I.Ya., Turchin T.Ya., Ermolova A.S. Remote Monitoring of State Forest Shelterbelts in the Steppe Zone of European Russia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 3, pp. 44–59. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-44-59>

Введение

Государственные защитные лесные полосы (ГЗЛП), значительная часть насаждений которых была создана более 60 лет назад, в настоящее время являются не только составляющей экологического каркаса засушливых степных территорий, но и уникальным объектом для изучения способов степного лесоразведения в жестких почвенно-климатических условиях. Из 8 ГЗЛП 4 расположены на плакорных территориях, 4 – по берегам рек Волги, Дона, Северского Донца, Урала. Топология насаждений ГЗЛП определила основные выполняемые ими экологические функции. Водораздельные лесополосы предназначены в первую очередь для защиты сельскохозяйственных земель от экстремальных погодных явлений (мелиоративная и противоэрозионная роль), приречные – для защиты водотоков от заиления и загрязнения (водоохранная и противоэрозионная роль). При создании насаждений ГЗЛП были использованы более 30 видов древесных и кустарниковых пород, подходящих к тем или иным лесорастительным условиям вдоль трасс ГЗЛП. Апробированы разные схемы смешения пород и технологии создания широкополосных защитных насаждений на различных типах почв степной зоны.

В настоящее время ГЗЛП на территории России, как и их зарубежные аналоги, представляют собой сформировавшиеся биогеоценозы и выполняют климаторегулирующие, водоохраные, почвозащитные, рекреационные функции, что подтверждается многочисленными исследованиями [1, 3, 4, 7, 11, 13, 14, 16, 19, 20, 21, 25]. Большой объем насаждений ГЗЛП достиг возраста естественной спелости, часть из них имеет неудовлетворительное санитарное состояние и находится на различных стадиях распада. Назрела необходимость оценки состояния и устойчивости ГЗЛП для разработки комплекса лесохозяйственных мероприятий, способствующих сохранению площадей леса и поддержанию его экологической функциональности.

Цель исследования – оценить современное состояние насаждений ГЗЛП в разных почвенно-климатических условиях на территории степной зоны европейской части России (ЕЧР).

Задачи:

проанализировать почвенно-климатические условия степной зоны ЕЧР;

в разных почвенно-климатических условиях выделить ключевые участки насаждений ГЗЛП и провести их натурные обследования для определения лесоводственно-таксационных характеристик древостоев;

осуществить дешифрирование космических снимков насаждений ГЗЛП, взяв за основу данные натурных обследований ключевых участков;

дать актуальную таксационную характеристику насаждениям ГЗЛП и оценить их санитарное состояние на основе данных космических снимков.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования стали искусственные насаждения приречных ГЗЛП «Воронеж – Ростов-на-Дону», «Белгород – р. Дон» и водораздельной ГЗЛП «Волгоград – Элиста – Черкесск», произрастающие на разных подтипах черноземов и каштановых почв степной зоны ЕЧР в границах Воронежской, Ростовской, Волгоградской областей, Ставропольского края и Республики Калмыкии.

Лесохозяйственное районирование региона исследований проведено на основе анализа почвенно-климатических условий по литературным данным и с учетом рекомендаций «Методического руководства...» [12].

Метод дистанционного зондирования Земли из космоса в рассматриваемом контексте является наиболее целесообразным, поскольку требуется охватить исследованиями протяженные в пространственном отношении и значительно различающиеся по таксационным характеристикам объекты.

Выбор мест натурных обследований осуществлялся на основе анализа общедоступных данных спутниковой съемки с сенсоров Landsat 8 в соответствии с методикой, разработанной Отделом лесоводства и лесоустройства ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства». Космические снимки получены с официального сайта геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Радиометрическая калибровка, атмосферная коррекция и последующее дешифрирование снимков производились с применением программного комплекса ENVI 5.2 [18].

Визуальное дешифрирование снимков осуществлялось при помощи комбинации диапазонов «естественные цвета» и «искусственные цвета». ГЗЛП выделялись с использованием материалов лесоустройства, современной поисково-картографической службы «Яндекс.Карты», а также на основе разделения территорий по нормализованному дифференцированному вегетационному индексу NDVI в зимний период. NDVI представляет собой отношение разности отражения в ближнем инфракрасном (5-й канал на снимках) и красном (4-й канал) диапазонах спектра к их сумме [17, 23, 24, 26, 27]:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где NIR – отражение в ближнем инфракрасном канале; RED – отражение в красном канале.

Изменяясь от –1 до +1, NDVI позволяет отличать объекты растительного происхождения от других, а также получать информацию о характере растительности – объеме биомассы, проективном покрытии, продуктивности. Для густой здоровой растительности свойственны значения NDVI 0,7 и выше; для разреженной – около 0,5 [2, 6, 8, 10, 17].

Места закладки пробных площадей определялись при помощи алгоритма неконтролируемой классификации лесных полос (IsoData), а также анализа территории по индексу содержания влаги в растительности на основе индекса стресса влажности MSI для снимков за период июля–августа. Индекс вычислялся через отношение отражений в среднем инфракрасном и ближнем инфракрасном диапазонах (каналы 6 и 5 соответственно) [17, 26, 27]:

$$MSI = SWIR1/NIR,$$

где SWIR 1 – отражение в среднем инфракрасном канале.

Индекс MSI находится в интервале от 0,00 до 3,00, для лесной растительности – от 0,04 до 2,00 [2, 17].

Автоматически найденные классы с учетом различий индекса MSI позволили выделить ключевые участки исследований и места закладки на них временных пробных площадей (ВПП) для полного охвата лесорастительных условий и разнообразия лесных насаждений в пределах ГЗЛП.

В соответствии с действующими Методическими рекомендациями по проведению государственной инвентаризации лесов (приказ Рослесхоза № 472 от 10.11.2011) заложены ВПП и определены таксационные характеристики насаждений. Было обследовано 88 ВПП в насаждениях различного породного состава в неодинаковых лесохозяйственных районах региона исследований. Получены современные таксационные характеристики насаждений и данные об их санитарном состоянии.

Санитарное состояние насаждений при натурных обследованиях находилось как средневзвешенная оценка состояния деревьев в соответствии с Правилами санитарной безопасности в лесах (постановление Правительства РФ № 2047 от 09.12.2020). Если она составляла не более 1,5, насаждение относили к здоровым; не более 2,5 – к ослабленным; не более 3,5 – к сильно ослабленным; не более 4,5 – к усыхающим; более 4,5 – к погибшим.

ВПП были использованы в качестве опытных эталонных объектов для инвентаризации насаждений ГЗЛП посредством визуального и автоматизированного дешифрирования космических снимков. Применялись методы классификации с обучением, классификации насаждений по величинам NDVI и MSI [18, 22]. На основании классификации охарактеризованы сохранность насаждений ГЗЛП, их породный состав, густота, относительная полнота и санитарное состояние. Верификация результатов дешифрирования осуществлялась посредством сравнения вычисленных показателей и фактического состояния насаждения по данным натурных наблюдений. После дешифрирования получена обобщенная характеристика насаждений ГЗЛП в различных почвенно-климатических условиях степной зоны ЕЧР.

Результаты исследования и их обсуждение

В целом регион исследования принадлежит южной части Восточно-Европейской (Русской) равнины [9]. Трассы ГЗЛП «Воронеж – Ростов-на-Дону» и «Белгород – р. Дон» проходят соответственно вдоль русел рек Дон и Северский Донец. Трасса ГЗЛП «Волгоград – Элиста – Черкесск» – через возв. Ергени, Кумо-Приманычскую впадину, низовья рек Большого Егорлыка и Калауса, а также через третичное плато с изрезанным рельефом [5].

Континентальность климата региона исследования возрастает с северо-запада на юго-восток. Вместе с этим меняются и почвенные условия. Территория степной зоны ЕЧР разделена на 2 пояса по зональным типам почв: пояс черноземов и пояс каштановых почв.

Преимущественно в долинах рек, а также местами на водоразделах в границах региона встречаются массивы песчаных почв. Большая часть песчаных массивов приурочена к левобережью Дона [15].

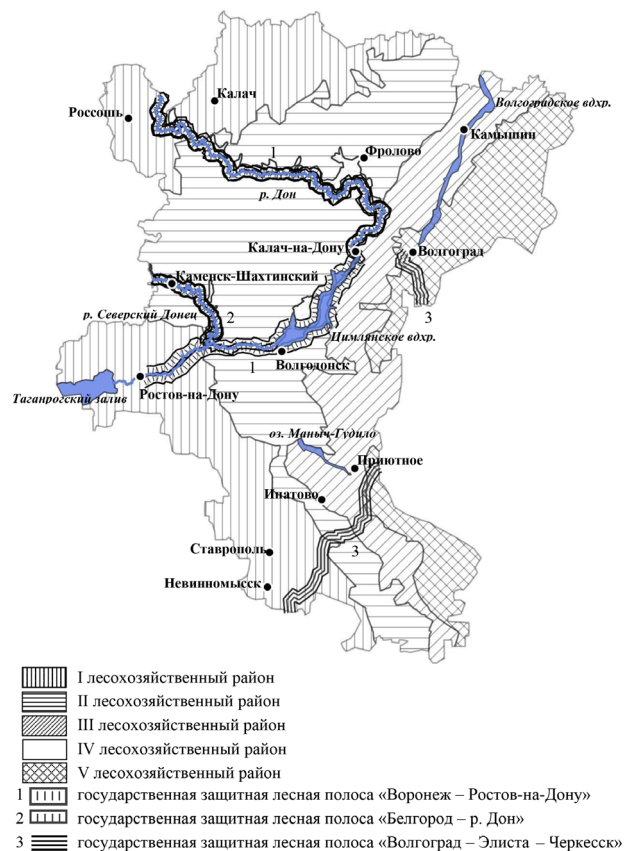
Гидротермический коэффициент показывает, что пояс черноземных почв и песчаные массивы региона исследований в основном лежат в засушливой подзоне степной зоны, каштановые почвы – преимущественно в очень засушливой и сухой подзонах.

На основании характеристики изучаемых насаждений и с учетом «Методического руководства...» [12] в пределах региона исследования выделены по почвенным и климатическим условиям 5 лесохозяйственных районов (ЛХР): разнотравно-степной с преобладанием черноземов обыкновенных; засушливо-сухостепной на черноземах южных и на темно-каштановых почвах; сухостепной на каштановых почвах; засушливо-сухостепной на азональных песчаных почвах; полупустынный на светло-каштановых почвах с наличием солонцов и солончаков.

На рисунке приведена карта-схема указанных лесохозяйственных районов степной зоны с нанесенными трассами исследуемых ГЗЛП.

Лесохозяйственные районы
степной зоны ЕЧР

Forestry areas of the steppe
zone of the European part
of Russia



На 8 космоснимках выделены участки с насаждениями ГЗЛП, их общая площадь составила 11 084,8 га. К участкам в программном комплексе ENVI 5.2 был применен метод неконтролируемой классификации IsoData с количеством кластеров от 5 до 10 в зависимости от степени различия лесорастительных условий на исследуемой территории. Установленные места расположения отдельных кластеров позволили подобрать географические координаты опытных эталонных объектов, использованных впоследствии для дешифрирования изображений насаждений ГЗЛП на космоснимках. ВПП заложены в Воронежской, Ростовской, Волгоградской областях, Ставропольском крае и Республике Калмыкии, т. е. на территории всех выделенных лесохозяйственных районов, и охватывали насаждения, различающиеся по таксационным характеристикам и состоянию. Характеристика репрезентативности полученного опытного материала приведена в табл. 1.

Таблица 1

Данные натурных обследований насаждений ГЗЛП

Table 1

Field survey data of plantations of the state forest shelterbelts

ЛХР	Породный состав насаждений	ВПП, шт.	Возраст, лет	Густота, дер./га	Относительная полнота	Запас, м ³ /га	Индекс санитарного состояния
I	Дубняки	13	58–70	120–1680	0,4–1,0	21–508	1,3–4,5
	Ясенники	7					
	Березняки	3					
	Другие	3					
II	Дубняки	17	59–71	440–1560	0,5–0,9	58–734	1,4–4,6
	Ясенники	5					
	Вязовники	5					
	Робинники	5					
	Другие	1					
III	Дубняки	3	25, 64–69	390–900	0,5–0,8	13–110	1,5–4,8
	Вязовники	3					
	Ясенники	2					
	Робинники	1					
	Другие	1					
IV	Сосняки	10	63–69	640–1080	0,5–0,8	101–275	1,6–4,5
	Другие	1					
V	Вязовники	4	17–60	430–1300	0,5–0,7	14–100	2,2–4,9
	Ясенники	2					
	Дубняки	1					
	Робинники	1					
<i>Итого</i>	–	88	–	–	–	–	–

По данным табл. 1 видно, что натурными обследованиями были охвачены насаждения основных лесообразующих пород, таких как дуб черешчатый, ясени зеленый и обыкновенный, вяз мелколистный, робиния лжеакация, сосна обыкновенная, береза повислая, а также других (преимущественно мягколиственных) пород. Разброс по возрасту в обследованных насаждениях невысокий, лишь в районах с низкой сохранностью древостоев (V ЛХР), где они регулярно создаются заново, оценивалось состояние насаждений разных групп возраста. ВПП закладывались в древостоях с различными густотой, полнотой, производительностью и санитарным состоянием. Обследованные нами опытные эталонные объекты отражают сложившееся разнообразие породного состава, современное состояние ГЗЛП и могут быть использованы для дальнейшего дешифрирования космоснимков с помощью программного комплекса ENVI 5.2.

Визуальное дешифрирование снимков в комплексе с оценкой индекса NDVI позволяет выделить на территории ГЗЛП участки, на которых нет лесной растительности. Установлено, что при NDVI менее 0,30 лиственные породы на обследуемых участках отсутствуют, для участков с хвойными породами это значение составляет не более 0,25. Таким образом, вычислено, что на территории ГЗЛП лесная растительность отсутствует на площади: в I ЛХР – 189,5 га (7,7 % площади ГЗЛП), во II – 399,4 га (10,4 %), в III – 797,6 га (24,9 %), в IV – 315,3 га (28,1 %), в V (без учета межулисных пространств) – 233,2 га (63,5 %). Сохранность искусственных насаждений на территории ГЗЛП составляет: в I ЛХР – 92,3 %, во II – 89,6 %, в III – 75,1 %, в IV – 71,9 %, в V – 36,5 %. К участкам, на которых лесная растительность отсутствует, относятся прогалины, пустыри, необлесившиеся гари (преимущественно в сосняках), а также небольшие участки дорог. Снижение сохранности ГЗЛП от I к V ЛХР, очевидно, связано с тенденцией ухудшения лесорастительных условий степной зоны при движении с северо-запада на юго-восток.

Результаты обследований насаждений ГЗЛП разного породного состава и информация об их географическом положении (географические координаты) стали основой обучающей выборки в программном комплексе ENVI 5.2 для классификации насаждений по породному составу. Автоматическая классификация позволила установить площади и характер пространственного распределения насаждений разного породного состава (табл. 2).

На всех зональных почвах произрастают дубняки и ясенники, на азональных песчаных почвах – преимущественно хвойные насаждения, сосняки. По мере нарастания засушливости климата и снижения почвенного плодородия от I к V ЛХР доля дубняков уменьшается от 68,1 до 9,1 %. В дубняках преобладают смешанные дубово-ясеневые и дубово-вязовые насаждения. Доля площади ясенников в I–III ЛХР стабильна – около 27–28 %. Ясень зеленый – одна из немногих пород, удерживающих свои позиции в насаждениях на солонцеватых светло-каштановых почвах V ЛХР.

По мере ужесточения лесорастительных условий на смену дубнякам все в большей степени приходят вязовники. Искусственные насаждения с преобладанием вяза мелколистного начинают проследиваться во II ЛХР, а в условиях V ЛХР вязовники, в частности чистые по составу насаждения вяза мелколистного, преобладают в породном составе. Березняки в составе ГЗЛП отмеча-

ются на небольшой площади лишь на границе с лесостепной зоной. Основная территория участков с робинией лжеакацией в качестве главной породы зафиксирована во II ЛХР на черноземах южных и темно-каштановых почвах.

Таблица 2

Распространение насаждений главных пород ГЗЛП

Table 2

Distribution of plantations of the main species of the state forest shelterbelts

ЛХР	Главная лесобразующая порода	Преобладающие породы	Площадь, га	Площадь*, %
I	Дуб черешчатый	Дуб, ясень	983,7	43,5
		Дуб, клен	357,9	15,8
		Дуб, робиния	198,9	8,8
	Ясень зеленый/ ясень обыкновенный	Ясень, дуб	459,2	20,3
		Ясень, береза	173,3	7,7
Береза повислая	Береза, ясень	87,3	3,9	
II	Дуб черешчатый	Дуб, ясень	1052,1	30,5
		Дуб, вяз	423,2	12,3
	Ясень зеленый/ ясень обыкновенный	Ясень, дуб	699,2	20,3
		Ясень, вяз	229,5	6,6
	Робиния лжеакация	Робиния, ясень, вяз	599,8	17,4
Вяз мелколистный	Вяз, робиния	443,4	12,9	
III	Вяз мелколистный	Вяз, ясень	797,6	33,2
		Вяз, дуб	224,2	9,3
	Дуб черешчатый	Дуб, вяз	547,7	22,8
		Дуб, ясень	176,2	7,3
	Ясень зеленый/ ясень обыкновенный	Ясень, вяз	435,7	18,1
		Ясень, дуб	224,2	9,3
IV	Сосна обыкновенная	Сосна	806,9	100,0
V	Вяз мелколистный	Вяз	93,3	69,6
		Вяз, дуб, робиния	23,1	17,2
	Дуб черешчатый	Дуб	12,1	9,1
	Ясень зеленый	Ясень	5,5	4,1

*Отношение площади насаждений указанного породного состава к общей площади сохранившихся насаждений ГЗЛП.

Относительная полнота и густота определялись через спектральный индекс NDVI. Выявлена прямая (сильная и средняя по тесноте) корреляция полноты / густоты и NDVI. Подобраны уравнения регрессии, наиболее достоверно отображающие эту связь. По ним определялся интервал значений полноты / густоты, соответствующий величине NDVI на космоснимке.

В табл. 3 приведены результаты оценки полноты насаждений ГЗЛП в степной зоне по данным дешифрирования космоснимков.

Таблица 3

Характеристика относительной полноты насаждений ГЗЛП на основе индекса NDVI

Table 3

Characteristics of the relative density of plantations of the state forest shelterbelts based on the NDVI values

ЛХР	Коэффициент корреляции уровень значимости	Уравнение регрессии	Относительная полнота, га / %		
			низко- полнотные (менее 0,5)	средне- полнотные (0,5–0,7)	высоко- полнотные (более 0,7)
I	$\frac{0,68}{1\%}$	$y = -0,239x^2 + 0,733x + 0,164$	$\frac{543,9}{24,1}$	$\frac{700,6}{31,0}$	$\frac{1015,8}{44,9}$
II	$\frac{0,74}{1\%}$	$y = -0,293x^2 + 0,913x + 0,029$	$\frac{1030,6}{29,9}$	$\frac{781,2}{22,7}$	$\frac{1635,4}{47,4}$
III	$\frac{0,77}{5\%}$	$y = -0,466x^2 + 1,076x - 0,036$	$\frac{456,4}{19,0}$	$\frac{1094,5}{45,5}$	$\frac{854,7}{35,5}$
IV	$\frac{0,68}{5\%}$	$y = -0,186x^2 + 0,653x - 0,045$	$\frac{217,7}{27,0}$	$\frac{268,2}{33,2}$	$\frac{321,0}{39,8}$
V	$\frac{0,80}{5\%}$	$y = 0,085 \ln(x) + 0,361$	$\frac{85,6}{63,9}$	$\frac{30,1}{22,5}$	$\frac{18,3}{13,7}$
<i>Итого</i>	–	–	$\frac{2334,2}{26,2}$	$\frac{2737,6}{30,7}$	$\frac{3845,2}{43,1}$

Примечание: x – относительная полнота, y – NDVI.

Полнота является важной таксационной характеристикой насаждений, позволяющей судить об успешности роста древостоя, эффективности выполнения насаждением защитных функций. Относительная полнота также выступает как показатель качества сформировавшихся искусственных лесонасаждений.

Из табл. 3 видно, что в насаждениях ГЗЛП степной зоны распределение древостоев по полноте сейчас равномерно, с некоторым преобладанием по площади (43,1 % от общей площади) высокополнотных древостоев. Насаждения с высокой относительной полнотой преобладают в I–II ЛХР преимущественно на черноземных почвах; со средней полнотой – на каштановых почвах в III ЛХР; с низкой полнотой – на светло-каштановых почвах (особенно при наличии солонцеватости) в V ЛХР. На азональных песчаных почвах IV ЛХР также наблюдается небольшое превышение доли высокополнотных сосняков по отношению к низко- и среднеполнотным насаждениям.

Преобладание в ГЗЛП древостоев средней и высокой относительной полноты свидетельствует о том, что сформировавшиеся и сохранившиеся искусственные насаждения в основной массе имеют удовлетворительное и хорошее качество и, следовательно, выполняют свои экологические функции.

Для того чтобы охарактеризовать ГЗЛП по густоте, необходимо установить ее ориентировочную оптимальную величину в насаждениях разного породного состава в неодинаковых лесорастительных условиях. Это было сделано нами в соответствии с Руководством по ведению хозяйства в насаждениях государственных защитных лесных полос в Российской Федерации (приказ Федеральной службы лесного хозяйства России № 43 от 21.03.1996).

Для I–IV ЛХР вычислена средняя оптимальная густота спелых и перестойных насаждений. Для V ЛХР – приспевающих и спелых насаждений, поскольку средний возраст древостоев здесь ниже в связи с их недолговечностью и периодическим повторным искусственным возобновлением.

В результате дешифрирования космоснимков с применением регрессионного анализа взаимосвязи густоты древостоев с величиной NDVI установлены площади насаждений, имеющих густоту выше или ниже оптимальной (табл. 4).

Таблица 4

Характеристика густоты насаждений ГЗЛП на основе индекса NDVI

Table 4

Characteristics of the density of plantations of the state forest shelterbelts based on the NDVI values

ЛХР	Коэффициент корреляции уровень значимости	Уравнение регрессии	Средняя оптимальная густота	Площадь насаждений, га / %	
				оптимальная и выше	ниже оптимальной
I	$\frac{0,87}{1\%}$	$y = 0,129 \ln(x) - 0,310$	1200*	$\frac{1135,7}{50,2}$	$\frac{1124,6}{49,8}$
II	$\frac{0,82}{1\%}$	$y = 0,205 \ln(x) - 0,903$	1100*	$\frac{1855,1}{53,8}$	$\frac{1592,1}{46,2}$
III	$\frac{0,84}{5\%}$	$y = 0,201 \ln(x) - 0,887$	800*	$\frac{1076,2}{44,7}$	$\frac{1329,4}{55,3}$
IV	$\frac{0,86}{1\%}$	$y = 0,155 \ln(x) - 0,671$	850*	$\frac{457,9}{56,7}$	$\frac{349,0}{43,3}$
V	$\frac{0,80}{5\%}$	$y = 0,085 \ln(x) + 0,361$	750**	$\frac{55,0}{41,0}$	$\frac{79,0}{59,0}$
Итого	–	–	–	$\frac{4579,9}{50,6}$	$\frac{4474,1}{49,4}$

Примечание: x – густота, y – NDVI; * – спелые и перестойные насаждения; ** – приспевающие и спелые насаждения.

В целом в регионе наблюдается равновесие площадей насаждений ГЗЛП с разными показателями густоты. В I, II и IV ЛХР преобладают (до 13,4 %) насаждения с оптимальной и более высокой густотой. В III и V ЛХР, напротив, преобладают (до 18,0 %) насаждения с густотой, меньше оптимальной для данных условий произрастания. Густота входит в комплекс характеристик, определяющих санитарное состояние ГЗЛП, а также наряду с полнотой может быть использована при оценке экологической функциональности насаждений.

Основной характеристикой при оценке санитарного состояния является доля здоровых (без признаков усыхания) деревьев в насаждении. Для определения санитарного состояния насаждений методом дистанционного зондирования применялся спектральный индекс MSI, отражающий уровень стресса

влажности растительности, т. е. объем усыхания. Выявлены регрессионные зависимости между фактическим санитарным состоянием насаждений на ВПП и индексами MSI. Установлены интервалы значений MSI для соответствующих категорий санитарного состояния насаждений ГЗЛП. Определены площади и характер пространственного распределения насаждений разного санитарного состояния (табл. 5).

Таблица 5

Характеристика санитарного состояния насаждений ГЗЛП на основе индекса MSI

Table 5

Characteristics of the sanitary condition of plantations of the state forest shelterbelts based on the MSI values

ЛХР	Коэффициент корреляции уровень значимости	Уравнение регрессии	Индекс санитарного состояния, га / %				
			здоровые	ослабленные	сильно ослабленные	усыхающие	погибшие
I	$\frac{0,78}{1\%}$	$y = 0,069\ln(x) + 0,078$	$\frac{374,7}{16,6}$	$\frac{1297,6}{57,4}$	$\frac{360,1}{15,9}$	$\frac{156,8}{6,9}$	$\frac{71,1}{3,2}$
II	$\frac{0,74}{1\%}$	$y = 0,086\ln(x) + 0,070$	$\frac{326,4}{9,5}$	$\frac{1593,0}{46,2}$	$\frac{910,6}{26,4}$	$\frac{167,1}{4,9}$	$\frac{450,1}{13,0}$
III	$\frac{0,86}{1\%}$	$y = 0,078\ln(x) + 0,098$	$\frac{355,6}{14,8}$	$\frac{470,9}{19,6}$	$\frac{403,6}{16,8}$	$\frac{518,8}{21,6}$	$\frac{656,7}{27,2}$
IV	$\frac{0,87}{1\%}$	$y = 0,083\ln(x) + 0,075$	$\frac{99,9}{12,4}$	$\frac{271,6}{33,7}$	$\frac{209,9}{26,0}$	$\frac{143,6}{17,8}$	$\frac{81,9}{10,1}$
V	$\frac{0,87}{1\%}$	$y = 0,091\ln(x) + 0,087$	$\frac{4,4}{3,3}$	$\frac{12,4}{9,3}$	$\frac{31,2}{23,3}$	$\frac{39,7}{29,6}$	$\frac{46,3}{34,5}$
<i>Итого</i>	–	–	$\frac{1161,0}{12,8}$	$\frac{3645,5}{40,3}$	$\frac{1915,4}{21,2}$	$\frac{2332,1}{11,3}$	$\frac{1306,1}{14,4}$

Примечание: x – средневзвешенный индекс санитарного состояния насаждения, y – MSI.

Значительная доля площади ГЗЛП по региону представлена ослабленными и сильно ослабленными насаждениями, характеризующимися замедленным ростом и нарушением лесной среды. Это объясняется тем, что основная часть насаждений уже достигла возраста спелости, а лесохозяйственные мероприятия, направленные на улучшение роста и санитарной обстановки, практически не проводились.

В разных ЛХР ситуация неодинаковая. Так, на черноземах обыкновенных и южных, на темно-каштановых почвах I–II ЛХР преобладают (около 73 % площади) ослабленные и сильно ослабленные насаждения, сохраняющие свой экологический потенциал. В III ЛХР на каштановых почвах наблюдается примерно равное соотношение здоровых, ослабленных, сильно ослабленных насаждений, сохраняющих жизнеспособность (51,2 % площади), и усыхающих и погибших насаждений (48,8 % площади). Однако в дальнейшем ожидается развитие процессов деградации и распада насаждений в силу их возраста, сложных лесорастительных условий и отсутствия мероприятий по обновлению древостоя.

На песчаных почвах IV ЛХР здоровые, ослабленные и сильно ослабленные насаждения, сохраняющие жизнеспособность, занимают в сумме значи-

тельную долю площади – 72,1 %. Это, по нашему мнению, является достаточно высоким показателем устойчивости насаждений в условиях крайне бедных почв, засушливого и сухого климата, негативного антропогенного влияния и высокой подверженности территории лесным пожарам.

На светло-каштановых почвах с признаками солонцеватости в V ЛХР здоровых насаждений, несмотря на наличие средневозрастной и приспевающей возрастных групп, практически не обнаружено (3,3 % площади). Треть насаждений характеризуется замедленным ростом, значительным количеством ослабленных, усыхающих и усохших деревьев, разной степенью нарушенности лесной среды. Преобладающая доля площади здесь (64,1 %) занята усыхающими или погибшими насаждениями, находящимися в стадии распада.

Визуальный анализ показывает, что участки ГЗЛП, расположенные вблизи автомобильных дорог или населенных пунктов, как правило, характеризуются меньшими показателями полноты и густоты по сравнению со свойственными для рассматриваемых лесорастительных условий, несколько более ослабленным санитарным состоянием. В I–II ЛХР, где ГЗЛП имеют наибольшую сохранность среди всех районов, полнота и густота снижаются от центра к периферии насаждений. В III–V ЛХР такая тенденция наблюдается гораздо реже: в основном участки с удовлетворительными полнотой и густотой перемежаются с рединами и выпавшими участками. Насаждения ГЗЛП, примыкающие к лесным массивам искусственного или естественного происхождения, часто имеют более высокие показатели полноты, густоты и характеризуются лучшим санитарным состоянием, чем одиночно расположенные участки.

Заключение

Анализ природных условий степной зоны европейской части России позволил выделить лесохозяйственные районы со сходными почвенными и климатическими характеристиками, определяющими лесную растительность региона и ее состояние. Посредством визуального и спектрального анализа изображений государственных защитных лесных полос на космических снимках в пределах различных лесохозяйственных районов определены ключевые участки исследований и места закладки временных пробных площадей.

Путем натурных обследований получены актуальные и достоверные данные для дешифрирования космических снимков государственных защитных лесных полос. Установлено, что по мере ужесточения лесорастительных условий от I к V лесохозяйственному району сохранность искусственных насаждений снижается с 92,3 % на черноземах обыкновенных до 36,5 % на светло-каштановых почвах с признаками солонцеватости. Породный состав сохранившихся участков государственных защитных лесных полос от черноземов к светло-каштановым почвам также изменяется: доля дубняков неуклонно уменьшается, на смену им приходят насаждения вяза мелколистного. На азональных песчаных и супесчаных почвах IV лесохозяйственного района преобладают насаждения сосны.

Общая тенденция дигрессии насаждений от I к V лесохозяйственному району подтверждается также характером изменения их относительной полноты, густоты и санитарного состояния. На черноземах, темно-каштановых и песчаных почвах наблюдается преобладание высокополнотных древостоев, на

каштановых почвах – среднеполнотных, на светло-каштановых с признаками солонцеватости – низкополнотных. Анализ дифференцированной по лесохозяйственным районам ориентировочной оптимальной густоты на черноземах, темно-каштановых и песчаных почвах показал небольшое преобладание древостоев с оптимальной и выше густотой, а на каштановых и светло-каштановых – с густотой, ниже оптимальной. В санитарном отношении наиболее удовлетворительны также защитные лесные полосы на черноземах, темно-каштановых и песчаных почвах, где преобладают ослабленные и сильно ослабленные насаждения. На каштановых и светло-каштановых почвах основная доля площади покрыта усыхающими и погибшими насаждениями, что свидетельствует о процессе распада защитных лесных полос на этих территориях.

Проведенные исследования позволяют выявить в пределах государственных защитных лесных полос насаждения разного породного состава, характеризующиеся невысокой полнотой, редины и безлесные пространства, ослабленные в санитарном отношении насаждения и рекомендовать участки, для которых требуется лесохозяйственное воздействие в целях сохранения и восстановления леса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абакумов Б.А., Бабенко Д.К., Бартенева И.М., Виноградов В.Н., Долилевич М.И., Захаров В.В., Зыков И.Г., Касьянов Ф.М., Коптев В.И., Крюкова Е.А., Кулик Н.Ф., Лабазников Б.В., Макарычев Н.Т., Маланина З.И., Маттис Г.Я., Николаенко В.Т., Павловский Е.С., Персидская Л.Т., Савельева Л.С., Сенкевич А.А., Степанов А.М., Торохтун И.М., Трещевский И.В., Трибунская В.М. Защитное лесоразведение в СССР / под общ. ред. Е.С. Павловского. М.: Агропромиздат, 1986. 263 с.

Abakumov B.A., Babenko D.K., Bartenev I.M., Vinogradov V.N., Dolilevich M.I., Zakharov V.V., Zykov I.G., Kas'yanov F.M., Koptev V.I., Kryukova E.A., Kulik N.F., Labaznikov B.V., Makarychev N.T., Malanina Z.I., Mattis G.Ya., Nikolayenko V.T., Pavlovskiy E.S., Persidskaya L.T., Savel'yeva L.C., Senkevich A.A., Stepanov A.M., Torokhtun I.M., Treshchevskiy I.V., Tribunskaya V.M. *Protective Afforestation in the USSR*. Ed. by E. S. Pavlovskiy. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 263 p. (In Russ.).

2. Бочаров А.В., Тихомиров О.А. Использование корреляционного анализа данных дистанционного зондирования для оценки влияния водоемов на окружающую природную среду (на примере района Рыбинского водохранилища) // Изв. СамНЦ РАН. 2014. Т. 16, № 5. С. 1701–1706.

Bocharov A.V., Tikhomirov O.A. The Use of Correlation Analysis of Remote Sensing to Assess the Impact Basins on the Natural Environment (by the Example of the Rybinsk Reservoir). *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2014, vol. 16, no. 5, pp. 1701–1706. (In Russ.).

3. Ерусалимский В.И. Лесоразведение в степи. М.: ВНИИЛМ, 2004. 171 с.

Erusalimskii V.I. *Afforestation in the Steppe*. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 171 p. (In Russ.).

4. Ерусалимский В.И., Рожков В.А. Многофункциональная роль защитных лесных насаждений // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2017. Вып. 88. С. 121–137.

Erusalimskii V.I., Rozhkov V.A. The Multifunctional Role of Protective Forest Plantations. *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2017, iss. 88, pp. 121–137. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-121-137>

5. Иваненко Б.И. Государственная защитная лесная полоса Сталинград–Степной–Черкесск. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 24 с.

Ivanenko B.I. *State Forest Shelterbelt Stalingrad – Stepnoy – Cherkessk*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1949. 24 p. (In Russ.).

6. Ивлиева Н.Г., Росяйкина Е.А. Обработка данных дистанционного зондирования Земли в ГИС-пакете ArcGIS // Огарёв-ONLINE. 2015. № 4. Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/obrabotka-dannykh-distancionnogo-zondirovaniya-zemli-v-gis-pakete-arcgis> (дата обращения: 25.03.22).

Ivlieva N.G., Rosyaikina E.A. Processing of Remotely Sensed Data by Means of Arcgis Software. *Ogaryov-ONLINE*, 2015, no. 4. (In Russ.).

7. Костин М.В. Современное состояние, мелиоративный потенциал и возможности возобновления защитных лесных насаждений на водоразделах степной зоны ЕТР: дис. ... канд. с.-х. наук. Волгоград, 2009. 283 с.

Kostin M.V. *Current Condition, Meliorative Potential and Possibilities of Reforestation of Protective Forest Plantations in Watersheds of the Steppe Zone of the European Part of Russia*: Cand. Agric. Sci. Diss. Volgograd, 2009. 283 p. (In Russ.).

8. Курганович К.А., Макаров В.П. Использование вегетационных индексов NDVI для оценки влияния пожаров на динамику растительности Цасучейского бора // Вестн. ЗабГУ. 2015. № 2(117). С. 27–36.

Kurganovich K.A., Makarov V.P. The Use of NDVI Vegetation Indices to Assess the Influence of Wildfires on Tsasuchey Pine Forest Vegetation Dynamics. *Transbaikal State University Journal*, 2015, no. 2(117), pp. 27–36. (In Russ.).

9. Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с.

Kurnayev S.F. *Forest Site Zoning of the USSR*. Moscow. Nauka Publ., 1973. 203 p. (In Russ.).

10. Лиджиева Н.Ц., Уланова С.С., Федорова Н.Л. Опыт применения индекса вегетации (NDVI) для определения биологической продуктивности фитоценозов аридной зоны на примере региона Черные Земли // Изв. СГУ. Нов. сер. Сер.: Химия. Биология. Экология. 2012. Т. 12, вып. 2. С. 94–96.

Lidzhieva N.Ts., Ulanova S.S., Fedorova N.L. Application of Vegetation Index (NDVI) to Determine the Biological Productivity of Phytocenoses of Arid Zone as an Example of the Region Black Earth. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2012, vol. 12, iss. 2, pp. 94–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2012-12-2-94-96>

11. Листопадський М.А. Історія та сучасний стан лісосмуг біосферного заповідника «Асканія-Нова» // Біологічний вісник МДПУ. 2015. № 1. С. 156–210.

Listopadsky M.A. History and Present State of Forest Bells in the Biosphere Reserve “Askania Nova”. *Biological Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 156–210. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/2015012>

12. Манаенков А.С., Костин М.В., Шкуринский В.А., Сурхаев Г.А., Лепеско В.В., Кладиев А.К., Узолін А.И., Зеленьяк А.К., Панов В.И., Петелько А.И. Методическое руководство по повышению долговечности широкополосных защитных лесных насаждений на юге европейской территории России. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2013. 56 с.

Manayenkov A.S., Kostin M.V., Shkurinskiy V.A., Surkhayev G.A., Lepesko V.V., Kladiyev A.K., Uzolin A.I., Zelenyayak A.K., Panov V.I., Petel'ko A.I. *Methodical Guidance on the Durability of Broadband Protective Forest Plantations in the South of European Russia*. Volgograd, VNIALMI Publ., 2013. 56 p. (In Russ.).

13. Павловский Е.С. Экологическая роль защитных лесонасаждений в лесоаграрных ландшафтах // Тез. докл. конф. по основным проблемам теории и практики агролесомелиорации. Волгоград, 1982. С. 58.

Pavlovskiy E.S. Ecological Role of Protective Forest Plantations in Forest Agrarian Landscapes. *Proceedings of the Conference on the Main Issues of the Theory and Practice of Agroforestry*. Volgograd, 1982, p. 58. (In Russ.).

14. Сидаренко П.В., Засоба В.В., Богданов Э.Н., Ланцева Н.Н., Скрынников Д.С. Углероддепонирующая роль лесных насаждений государственной защитной лесной полосы (ГЗЛП) Волгоград – Элиста – Черкесск в степной зоне // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2014. № 38. С. 125–132.

Sidarenko P.V., Zasoba V.V., Bogdanov E.N., Lantseva N.N., Skrynnikov D.S. Carbon Deposited Role of State Forest Plantations Shelterbelts (SPFZ) Volgograd – Elista – Cherkessk

sk in the Steppe Zone. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa*, 2014, no. 38, pp. 125–132. (In Russ.).

15. Турчин Т.Я. Естественные степные дубравы Донского бассейна и их восстановление. М.: ВНИИЛМ, 2004. 312 с.

Turchin T.Ya. *Natural Steppe Oak Forests of the Don Basin and Their Regeneration*. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 312 p. (In Russ.).

16. Турчин Т.Я., Ермолова А.С., Баканов И.А. Оценка ресурсного потенциала насаждений государственной защитной лесной полосы «Воронеж – Ростов-на-Дону» // Музей-заповедник: экология и культура: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. Вешенская, 2019. С. 290–300.

Turchin T.Ya., Ermolova A.S., Bakanov I.A. Resource Potential Assessment of the State Forest Shelterbelt “Voronezh – Rostov-on-Don”. *Museum-Reserve: Ecology and Culture. Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference*. Vyoshenskaya, 2019. pp. 290–300. (In Russ.).

17. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.

Cherapanov A.S. Vegetation Indices. *Geomatics*, 2011, no. 2, pp. 98–102. (In Russ.).

18. ENVI 5.1. Environment for Visualizing Images. Руководство пользователя. М.: Совзонд, 2014. 242 с.

ENVI 5.1. *Environment for Visualizing Images*. User Guide. Moscow. Sovzond Publ., 2014. 242 p.

19. Ambrose E., Ceci P., Ulian T. Branching out Africa’s Great Green Wall. *The Environment, CIWEM*, 2019, vol. 09, pp. 16–17. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/335464913> (accessed 12.03.20).

20. Gardner R. Trees as Technology: Planting Shelterbelts on the Great Plains. *History and Technology*, 2009, vol. 25, iss. 4, pp. 325–341. <https://doi.org/10.1080/07341510903313014>

21. Juang J.-Y., Zhang J.-C., Yang Y., Zhang B., Li J. Effect of Forest Shelter-Belt as a Regional Climate Improver along the Old Course of the Yellow River, China. *Agroforestry Systems*, 2017, vol. 91, pp. 393–401. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9928-9>

22. Koch B. *Remote Sensing Supporting National Forest Assessment*. FAO, 2013. 15 p. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Remote-Sensing-supporting-national-forest-NFA-Koch> (accessed 05.03.20).

23. *Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing*. Ed. by P.S. Thenkabail. CRC Press, 2015. 885 p. <https://doi.org/10.1201/b19322>

24. *Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest*. Ed. by N. Baghdadi, M. Zribi. Elsevier, 2016. 454 p. <https://doi.org/10.1016/c2015-0-01224-2>

25. Marots G.A., Sorenson C.J. Depletion of a Great Plains Resource: The Case of Shelter-Belts. *Environmental Conservation*, 1979, vol. 6, iss. 3, pp. 215–224. <https://doi.org/10.1017/S0376892900003088>

26. Tuominen J., Lipping T., Kuosmanen V., Haapanen R. Remote Sensing of Forest Health. *Geoscience and Remote Sensing*. London, IntechOpen, 2009. <https://doi.org/10.5772/8283>

27. Xue J., Su B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, vol. 2017, art. 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 634.11:630*181.5
DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-60-72

Отбор полусибов видов рода *Malus L.* по показателям роста и формирования в пригородной зоне Красноярска

Н.П. Братилова[✉], *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: AAF-3074-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2918-9690>

Н.В. Моксина, *канд. с.-х. наук, доц.*; *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1387-0529>*

О.А. Герасимова, *аспирант*; *ResearcherID: ABF-3094-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6498-5986>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; nbratilova@yandex.ru[✉], n.moksina2010@yandex.ru, goa.1903@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.05.20 / Одобрена после рецензирования 18.08.20 / Принята к печати 21.08.20

Аннотация. Одной из самых востребованных и распространенных плодовых культур в умеренной зоне Северного полушария благодаря своему большому сортовому разнообразию и высокой биологической и экологической пластичности является яблоня. В подборе наиболее перспективного сортимента плодовых культур значительную роль играет экологическое сортоиспытание, позволяющее обеспечить стабильно высокую продуктивность насаждений на основе максимальной степени соответствия генотипа сорта конкретным почвенно-климатическим условиям места возделывания. Целью исследования являлся отбор однолетних полусибов яблони по показателям динамики роста и формирования фитомассы в условиях расположенного в пригородной зоне Красноярска Ботанического сада им. В.М. Крутовского. Растения, размноженные семенами, характеризуются широкими адаптивными возможностями при различных условиях внешней среды. Отбор сеянцев до плодоношения дает возможность сократить селекционный процесс. Изучение морфологических признаков листа яблони позволяет проводить отбор для ускоренной селекции сеянцев данного вида. Исследованы особенности роста семенного потомства 37 крупноплодных сортов яблони различного географического происхождения: 6 сортов селекции В.М. Крутовского (Аврора, Зеленое Крутовского, Красноярская красавица, Красноярский сибиряк, Красноярское, № 22), 10 сортов селекции И.В. Мичурина (Антоновка шафранная, Бельфлер-китайка, Восковое, Пепин-китайка, Пепин шафранный, Ренет бергамотный, Славянка, Антоновка желтая, Аркад зимний, Кулон-китайка), по 1 сорту селекции Р.И. Шредера (Нобилис) и зарубежной (новозеландской) селекции (Бисмарк). Большинство сортов (57 %) народной селекции выведены в европейской части России. По результатам исследования в течение вегетационного сезона 2020 г. определены динамика сохранности семядольных листьев, количество и размеры образованных листьев, высота и диаметр корневой шейки сеянцев. Установлено, что в данных условиях сохранность полусибов высокая. Наибольшей высотой отличались сеянцы сортов Антипасхальное, Анисик обыкновенный, Бабушкино, Малиновка, Пепин шафранный; бóльшим диаметром стволика – сеянцы сортов Антипасхальное, Анисик обыкновенный, Воронежский Воргуль, Кулон-китайка, Титовка; крупными листьями – сеянцы сортов Титовка, Папировка, Красноярский сибиряк, Антипасхальное. Выявлены достоверные различия по массе листа и LMA

(масса 1 см² листа в абсолютно сухом состоянии) в зависимости от принадлежности к летним или зимним категориям сортов яблони. Полученные результаты позволили выделить перспективные по скорости роста сеянцев сорта, что важно для дальнейших селекционных исследований.

Ключевые слова: яблоня, сеянцы, полусибь, сорт, изменчивость, высота, диаметр, фитомасса, ЛМА

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-34-90089.

Для цитирования: Братилова Н.П., Моксина Н.В., Герасимова О.А. Отбор полусибов видов рода *Malus* L. по показателям роста и формирования в пригородной зоне Красноярска // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 60–72. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-60-72>

Original article

Selection of Half-Sib Species of the Genus *Malus* L. by Growth and Formation Parameters in the Suburban Area of Krasnoyarsk

Natalia P. Bratilova[✉], Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAF-3074-2019](https://orcid.org/0000-0002-2918-9690),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2918-9690>

Natalia V. Moksina, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1387-0529>

Olga A. Gerasimova, Postgraduate Student; ResearcherID: [ABF-3094-2020](https://orcid.org/0000-0001-6498-5986),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6498-5986>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; nbratilova@yandex.ru[✉], n.moksina2010@yandex.ru, goa.1903@yandex.ru

Received on May 20, 2020 / Approved after reviewing on August 18, 2020 / Accepted on August 21, 2020

Abstract. The apple tree is one of the most popular and widespread fruit crops in the temperate zone of the Northern Hemisphere due to its great variety diversity and high biological and ecological plasticity. Ecological variety testing plays a significant role in the selection of the most promising range of varieties of fruit crops. It helps to ensure consistently high productivity of plantations based on the maximum degree of correspondence of the variety genotype to the specific soil and climatic conditions of the place of cultivation. The research was aimed at the selection of annual apple tree half-sibs by the indicators of growth dynamics and phytomass formation in the V.M. Krutovsky Botanical Garden located in the suburban area of Krasnoyarsk. Plants propagated by seeds are characterized by wide adaptive capabilities under various environmental conditions. Selection of seedlings before fruiting provides an opportunity to shorten the breeding process. The study of morphological features of the apple tree leaf allows the selection for accelerated breeding of seedlings of this species. The features of seed progeny growth of 37 large-fruited apple tree varieties of different geographical origin were studied. Among those are the following: 6 varieties of V.M. Krutovsky’s selection (Aurora, Krutovsky’s Green, Krasnoyarsk beauty, Krasnoyarskiy Sibiryak, Krasnoyarskoye, No. 22), 10 varieties of I.V. Michurin (Saffron Antonovka, Befler Chinese, Wax, Pepin Kitayka, Saffron Pepin, Renet Bergamot, Slavyanka, Antonovka Yellow, Winter Arkade, Kulon Kitaika), 1 variety of selection by R.I. Schroeder (Nobilis)



and foreign (New Zealand) selection (Bismarck). Most varieties (57 %) of folk selection bred in the European part of Russia. Dynamics of preservation of cotyledon leaves, number and size of formed leaves, height and diameter of the root neck of seedlings were determined based on the results of the study during the growing season of 2020. The safety of half-sibs was found to be high under these conditions. Seedlings of varieties Antipaskhalnoye, Anisik obyknovennyi, Babushkino, Malinovka and Saffron Peppin showed the maximum height; seedlings of varieties Antipaskhalnoye, Anisik obyknovennyi, Voronezh Vorgul, Kulon Kitayka and Titovka showed larger trunk diameter; seedlings of varieties Titovka, Papirovka, Krasnoyarskiy Sibiryak and Antipaskhalnoye had large leaves. Reliable differences in leaf weight and LMA (weight of 1 cm² of leaf in absolutely dry state) were revealed depending on belonging to summer or winter categories of apple varieties. The obtained results allowed identifying promising varieties in terms of rapid growth of seedlings, which is important for further breeding research.

Keywords: apple tree, seedlings, half-sibs, variety, variability, height, diameter, phytomass, LMA

Acknowledgements: The research was funded by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project 19-34-90089.

For citation: Bratilova N.P., Moksina N.V., Gerasimova O.A. Selection of Half-Sib Species of the Genus *Malus* L. by Growth and Formation Parameters in the Suburban Area of Krasnoyarsk. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 3, pp. 60–72. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-60-72>

Введение

Яблоня – плодовая культура, отличающаяся хорошими вкусовыми качествами и лежкостью плодов, высокими урожайностью и зимостойкостью, большим сортовым разнообразием, биологической и экологической пластичностью [8, 15]. Такие характеристики делают яблоню одной из самых востребованных и распространенных плодовых культур в умеренной зоне Северного полушария.

Для древостоев, произрастающих на территории Сибири с резко континентальным климатом, крайне важен высокий уровень зимостойкости.

Семенное размножение позволяет получать растения, не зараженные вирусными болезнями, которые часто встречаются у растений, размножаемых вегетативно. Растения, размноженные семенами, характеризуются широкими адаптивными возможностями при различных условиях внешней среды, формируют мощную корневую систему, способную нормально функционировать даже при засухе. Ускорение роста сеянцев яблони способствует более раннему вступлению в плодоношение [11, 12].

И.В. Мичурин был первым, кто обратил внимание на существование ювенильного периода у плодовых. Исследователь показал, что изучение данного периода представляет большой теоретический и практический интерес для селекции. Ювенильный период начинается с момента прорастания семени и продолжается до вступления растения в пору плодоношения. Именно в этот период желательно провести отбор сеянцев яблони по устойчивости к неблагоприятным факторам среды, болезням и вредителям, по силе и характеру роста (компактности, колонновидности), а также другим морфологическим признакам («культурности»). Желательными признаками являются «тучное» развитие всего растения, опушенность побегов, частое расположение почек, их крупные

размеры, большая выпуклость подпочечных подушечек, матовая морщинистая лицевая сторона листа, его густое и мелкое жилкование, городчатая (а не пильчатая) зазубренность края листовой пластинки, короткий, толстый и опушенный черешок, крупные прилистники, отсутствие мелких колючек [14].

Древесные культуры, в том числе яблоня, имеют длительный ювенильный период, что становится серьезным препятствием для генетического улучшения культуры и ее экспериментальных исследований [18, 19, 23]. Очень важной задачей в ускорении селекционного прогресса яблони является разработка методов сокращения периода молодости растения. От посева семян до первого цветения сеянцев часто проходит от 5 до 12 лет. Только после этого можно приступать к полной оценке потомства [17, 20]. Длинная ювенильная фаза у *Malus* – серьезное препятствие для быстрого внедрения агрономически значимых признаков [21].

Отбор сеянцев до плодоношения является важным приемом сокращения селекционного процесса [10, 11, 13, 22]. Установлено наличие корреляции ($r = 0,31-0,97$) между отдельными парами сопряженных признаков, что дает сравнительно точное предсказание при отборе перспективных сеянцев яблони на ранних этапах развития.

Для яблони выявлены положительные связи между рядом признаков. Тесная положительная связь отмечена между сильнорослостью сеянцев и их скороплодностью. Положительная связь – между интенсивностью осенней окраски листвы у взрослых сеянцев яблони и окраской плодов. Сеянцы яблони с летним созреванием плодов обычно раньше приобретают интенсивную окраску листьев. Гораздо больше форм с улучшенным вкусом плодов отбирается среди сеянцев, в однолетнем возрасте имевших крупные листья с короткими черешками. Среди сеянцев яблони, которые в 3–4-летнем возрасте характеризовались более высокой общей селекционной оценкой, в дальнейшем выделено в 2 раза больше отборных форм, чем среди сеянцев с низкой селекционной оценкой [11]. Также установлена связь между размером семядолей и крупноплодностью [6]. Отсутствие антоциановой окраски листового черешка свидетельствует о привлекательности внешнего вида плодов. Толстый черешок листа обеспечивает большую вероятность отбора форм с окрашенными плодами. Толстые побеги и черешок листа указывают на более ранний срок созревания плодов. Слабая опушенность листа, короткий черешок и его менее интенсивная окрашенность свидетельствуют о более раннем вступлении сеянца в плодоношение [1].

Из исследований А.В. Журавлевой и др. [4] следует, что корреляционные пары морфологических признаков листьев и морфологических хозяйственно ценных признаков плодов яблони позволяют по ширине и площади листовой пластины определять массу и вкусовые качества плодов. Особенно часто указывают на зависимость между размерами листа и плода [8]. По диаметру штамба можно в какой-то мере прогнозировать урожайность. Использование выделенных корреляций на ранних этапах отбора позволит значительно сократить продолжительность селекции плодовых культур.

Потенциал тестирования новых сортов яблони и возможность выявления ценных признаков напрямую зависят от наличия достаточного генетического разнообразия [16].

Цель исследования – изучение динамики роста и показателей формирования фитомассы однолетних полусибов яблони в пригородной зоне г. Красноярска.

Объекты и методы исследования

Ботанический сад им. В.М. Крутовского расположен на юго-западе пригородной зоны г. Красноярска (устье р. Лалетина) и занимает площадь 32,8 га. Территория сада находится на стыке Канско-Рыбинской котловины и лесостепной зоны Западно-Сибирской равнины с предгорьями Восточных Саян, на границе южной и северной лесостепей [5]. Сад занимает участки I и II надпойменных террас правого берега р. Енисей.

Осенью 2019 г. произведен посев семян 37 сортов яблони, произрастающих на верхней террасе ботанического сада, и 6 сортов от свободного опыления с нижней террасы. Сеянцы были выращены в одинаковых условиях на верхней террасе ботанического сада. Для этого участка характерны дерново-карбонатные типичные известковые почвы. Гранулометрический состав соответствует среднесуглинистым почвам. Содержание гумуса высокое (6,5–11 %). Почвы хорошо обеспечены подвижными соединениями азота, фосфора, калия, но имеют повышенную физическую сухость из-за содержания солей CaCO_3 и CaSO_4 [2].

В течение вегетационного периода 2020 г. измерены показатели сеянцев в динамике (июнь, июль, август). Всего изучено 1788 сеянцев, из которых 387 использовано для определения фитомассы. У всходов устанавливались наличие семядольных листьев, количество листовых пластинок с определением их площади, высота и диаметр корневой шейки. В последней декаде августа 2020 г. часть сеянцев (по 9 шт. с каждого из 43 рядов) были выкопаны для выявления размеров и фитомассы с учетом надземных и подземной фракций. Сеянцы высушивали в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ до абсолютно сухого состояния (а.с.с.) при температуре 100–105 °С.

Статистическую обработку результатов исследований осуществляли по Б.А. Доспехову [3] с помощью программы Microsoft Excel, уровень изменчивости определяли по шкале С.А. Мамаева [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Грунтовая всхожесть семян была равна 62,5 %. Количество жизнеспособных сеянцев в июне составило 1344 шт., в июле снизилось до 1319 шт. В августе 2020 г. на опытном участке сохранилось 1293 сеянца. Отпад за вегетационный сезон составил 3,8 % (рис. 1).

Всходы яблони при прорастании выносят на поверхность семядоли, которые превращаются в семядольные листья [7]. Оценивали длительность сохранения семядольных листьев у всходов разных сортов яблони. В июне 2020 г. число всходов с семядольными листьями составило 1110 из 1344 шт. (82,6 %), в июле – 159 из 1319 шт. (12,0 %), в августе растений с семядольными листьями не выявлено.

Высота сеянцев варьировала от $4,5 \pm 0,03$ см в июне до $8,8 \pm 0,12$ см в августе. В июне наблюдался высокий уровень изменчивости высоты сеянцев, в июле и августе – очень высокий (более 40 %) (табл. 1).



Рис. 1. Внешний вид сеянцев в июне, июле и августе

Fig. 1. Seedlings appearance in June, July and August

Таблица 1

Высота сеянцев яблони, см

Table 1

Seedling height of apple trees, cm

Дата измерения	\bar{x}	$\pm m$	$\pm \sigma$	P, %	V, %
13 июня 2020 г.	4,5	0,03	1,27	0,8	28,2
15 июля 2020 г.	7,8	0,11	3,90	1,4	49,9
20 августа 2020 г.	8,8	0,12	4,36	1,4	49,3

Средняя высота сеянцев крупноплодных сортов яблони по данным измерений на 13 июня 2020 г. варьировала от $3,1 \pm 0,16$ см (Нобилис) до $5,6 \pm 0,17$ см (Анисик обыкновенный) (табл. 2). По этому показателю сорт Анисик обыкновенный значительно отличался от большинства сортов ($t_{\phi} > t_{05} = 1,99$). Исключение составили сорта Кулон-китайка, Папировка, Пепин шафранный и Титовка. Средний уровень изменчивости [14] высоты сеянцев в июне наблюдался у сортов № 22, Аврора, Анисик обыкновенный, Антоновка обыкновенная, Аркад зимний, Астраханское белое, Бельфлер-китайка, Бисмарк, Зеленое Крутовского, Кулон-китайка, Медовка, Славянка и Тень. У остальных сортов отмечен высокий уровень изменчивости (21–40 %).

В июле максимальной высоты достигли сеянцы сорта Антипасхальное ($12,7 \pm 1,22$ см), несколько уступали сорта Анисик обыкновенный, Папировка, Малиновка, Пепин шафранный. Наименьшая высота отмечена у сеянцев сортов Зеленое Крутовского, Тень. У большинства растений (72,9 %) по данному показателю наблюдался очень высокий уровень изменчивости, у 27,1 % – высокий.

В конце вегетационного сезона 2020 г. наибольшей высотой характеризовались сеянцы сорта Антипасхальное ($14,6 \pm 1,31$ см), меньшей по сравнению с ним сорта Анисик обыкновенный, Бабушкино, Малиновка, Пепин шафранный. Наименьшая высота отмечена у сеянцев сортов Зеленое Крутовского ($6,3 \pm 0,38$ см), Тень ($5,2 \pm 0,26$ см) и Коричное полосатое ($6,6 \pm 0,39$ см). Уровень изменчивости у 35,5 % растений высокий, у 64,9 % – очень высокий.

Таблица 2

Биометрические показатели полусибов яблони за вегетационный период 2020 г., см

Table 2

Biometric indices of apple tree half-sibs for the growing season of 2020, cm

Сорт	Прирост		Высота						Диаметр корневой шейки	
	июль-август		июнь		июль		август		$\bar{x} \pm m$	V, %
	июль-июль	июль-август	$\bar{x} \pm m$	V, %	$\bar{x} \pm m$	V, %	$\bar{x} \pm m$	V, %		
№ 22	3,3	1,1	5,0±0,17	19,9	8,3±0,59	42,2	9,4±0,63	39,4	0,28±0,009	18,0
Аврора	2,4	0,5	3,9±0,12	18,0	6,3±0,53	48,1	6,8±0,59	50,1	0,26±0,009	20,9
Анисик обыкновенный	6,0	1,3	5,6±0,17	17,1	11,6±0,79	37,6	12,9±0,87	36,9	0,31±0,011	20,5
Антипахальное	7,2	1,9	5,5±0,28	24,4	12,7±1,22	45,9	14,6±1,31	42,1	0,33±0,014	20,0
Антоновка желтая	4,0	2,2	4,0±0,14	21,7	8,0±0,61	45,2	10,2±0,88	50,9	0,26±0,011	25,9
Антоновка обыкновенная	3,0	0,8	4,5±0,14	18,9	7,5±0,46	35,9	8,3±0,56	39,7	0,29±0,008	16,8
Антоновка шафранная	4,7	1,6	4,4±0,15	20,3	9,1±0,68	43,1	10,7±0,77	40,7	0,30±0,008	14,3
Апорт среднерусский	1,9	0,6	4,4±0,22	28,0	6,3±0,49	43,3	6,9±0,52	41,7	0,27±0,008	15,9
Аркад зимний	3,3	2,6	4,4±0,14	19,9	7,7±0,62	49,3	10,3±1,03	59,7	0,22±0,010	28,1
Аркад стаканчатый	3,8	2,3	3,5±0,28	32,9	7,3±0,68	37,4	9,6±0,95	40,6	0,25±0,017	26,9
Астраханское белое	2,9	1,7	4,3±0,14	19,0	7,2±0,59	47,1	8,9±0,74	47,7	0,25±0,012	28,5
Бабушкино	5,0	2,2	4,3±0,19	22,2	9,3±0,86	45,3	11,5±0,92	38,3	0,25±0,011	22,3
Белый налив	3,3	0,8	4,9±0,19	32,3	8,2±0,45	45,4	9,0±0,50	44,6	0,28±0,007	21,3
Бефлер-китайка	2,8	1,4	5,0±0,13	16,0	7,8±0,44	35,3	9,2±0,48	32,4	0,28±0,010	21,5
Бисмарк	2,8	0,5	5,1±0,13	18,9	7,9±0,43	42,1	8,4±0,46	41,8	0,29±0,008	20,1

Воронежский Воргуль	4,6	1,1	4,8±0,25	24,6	9,4±0,62	28,7	10,5±0,80	32,3	0,33±0,013	16,5
Восковое	4,3	1,1	3,7±0,16	24,0	8,0±0,65	46,0	9,1±0,67	41,6	0,29±0,010	20,0
Генерал Орлов	1,5	1,0	4,9±0,17	23,6	6,4±0,44	46,6	7,4±0,54	49,3	0,26±0,007	17,5
Грушовка московская	2,3	0,7	4,5±0,19	37,5	6,8±0,54	71,2	7,5±0,57	67,2	0,27±0,007	23,8
Зеленое Крутовского	1,3	0,6	4,4±0,13	19,6	5,7±0,34	40,6	6,3±0,38	41,5	0,26±0,005	14,3
Золотой шип	3,4	0,4	4,9±0,17	27,2	8,3±0,42	38,9	8,7±0,43	37,6	0,28±0,008	21,4
Коричное полосатое	2,8	0,3	3,5±0,15	35,7	6,3±0,39	50,7	6,6±0,39	47,0	0,27±0,010	29,0
Красноярская красавица	2,5	0,6	3,9±0,15	24,2	6,4±0,55	53,2	7,0±0,60	52,7	0,22±0,011	29,4
Красноярский сибиряк	4,5	1,1	4,1±0,25	31,2	8,6±0,79	46,1	9,7±0,82	42,5	0,26±0,011	21,1
Красноярское	3,6	1,4	3,9±0,27	28,8	7,5±0,72	33,4	8,9±0,78	32,6	0,29±0,010	12,7
Кулон-китайка	3,9	0,7	5,0±0,27	19,9	8,9±0,93	34,8	9,6±0,88	30,2	0,32±0,010	11,5
Малиновка	5,9	1,8	4,6±0,31	30,4	10,5±1,05	40,1	12,3±1,17	42,6	0,27±0,016	26,2
Медовка	2,4	0,7	4,3±0,16	19,3	6,7±0,60	46,1	7,4±0,64	44,3	0,26±0,010	20,2
Нобилис	3,4	1,4	3,1±0,16	22,3	6,5±0,64	31,3	7,9±0,77	35,5	0,27±0,017	25,8
Пашировка	4,9	0,9	5,3±0,23	30,5	10,2±0,78	51,5	11,1±0,78	46,8	0,29±0,013	30,0
Пелин-китайка	4,6	1,6	4,4±0,19	26,2	9,0±0,68	45,1	10,6±0,75	41,5	0,24±0,009	20,9
Пелин шафранный	5,0	1,2	5,2±0,21	24,8	10,2±0,90	51,9	11,4±0,84	43,6	0,29±0,012	25,2
Петербургское летнее	4,6	1,0	3,6±0,14	23,7	8,2±0,54	40,6	9,2±0,55	37,5	0,24±0,009	24,4
Ренет бергамотный	2,2	0,6	4,6±0,19	22,3	6,8±0,64	49,6	7,4±0,60	36,4	0,27±0,017	31,5
Славянка	2,9	0,8	4,5±0,15	19,1	7,4±0,58	46,2	8,2±0,66	46,1	0,29±0,009	18,2
Тень	0,9	0,3	4,0±0,13	19,1	4,9±0,21	26,6	5,2±0,26	30,8	0,23±0,007	19,3
Титовка	1,9	0,9	5,5±0,24	21,9	7,4±0,66	45,6	8,3±0,72	43,4	0,30±0,013	22,3

Прирост в высоту в июне–июле варьировал от 0,9 см у сорта Тень до 7,2 см у сорта Антипасхальное. В июле–августе у большинства семян данный показатель не превышал 2,0 см. Исключением стали семена сортов Антоновка желтая и Бабушкино (прирост по 2,2 см), Аркад зимний и Аркад стаканчатый (2,6 и 2,3 см соответственно).

Максимальный диаметр корневой шейки в конце вегетационного сезона зафиксирован у сорта Антипасхальное ($0,33 \pm 0,014$ см). Большими значениями данного показателя также отличаются семена сортов Анисик обыкновенный, Воронежский Воргуль, Кулон-китайка, Титовка. Наименьшие значения прослеживались у сортов Красноярская красавица, Аркад зимний, Тень.

Результаты исследований, приведенные на рис. 2, наглядно демонстрируют увеличение числа сформированных листьев у семян в разные периоды вегетационного сезона. Так, в июне наблюдалось 4–5 листьев на семени, в июле – 7–12, в августе – 7–14.

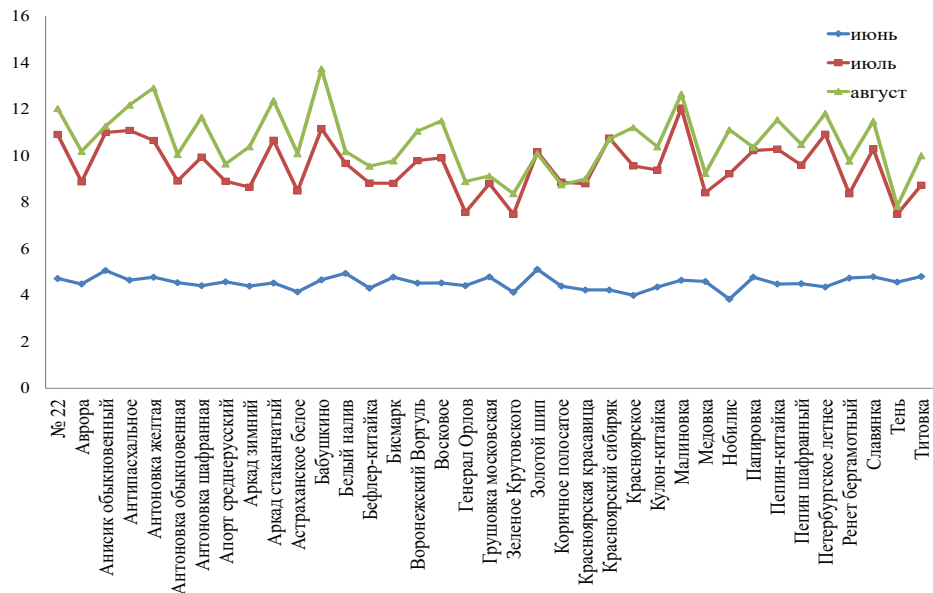


Рис. 2. Количество листьев в летние месяцы, шт.

Fig. 2. Number of leaves in summer months, pcs

Наибольшее число листьев у сеянцев образовалось до 15 июля 2020 г. Во второй половине летнего сезона увеличение количества листьев у сеянцев было незначительное. Максимальным количеством листьев в августе характеризуется сорт Бабушкино.

Данные, представленные на рис. 3, позволяют сделать вывод, что большей ($8,0 \text{ см}^2$) площадью листовой пластинки характеризуются сеянцы сортов Титовка, Папировка, Красноярский сибиряк, Антипасхальное; меньшей ($4,5 \text{ см}^2$) – сортов Тень, Красноярская красавица, Восковое, Аркад стаканчатый.

В конце вегетационного сезона сеянцы имели фитомассу в а.с.с. $1,57 \pm 0,043$ г с вариацией от 0,08 до 5,28 г. Подземная фитомасса составила 57,3 % от общей

фитомассы растений, листья – 28,7 %, стебель – 14,0 %. Средняя площадь одного листа сеянцев – $6,0 \pm 0,1$ см². Масса 1 листа в а.с.с. – $0,110 \pm 0,002$ г с вариацией от 0,07 г у сорта Аркад стаканчатый до 0,15 г у сорта Кулон-китайка.

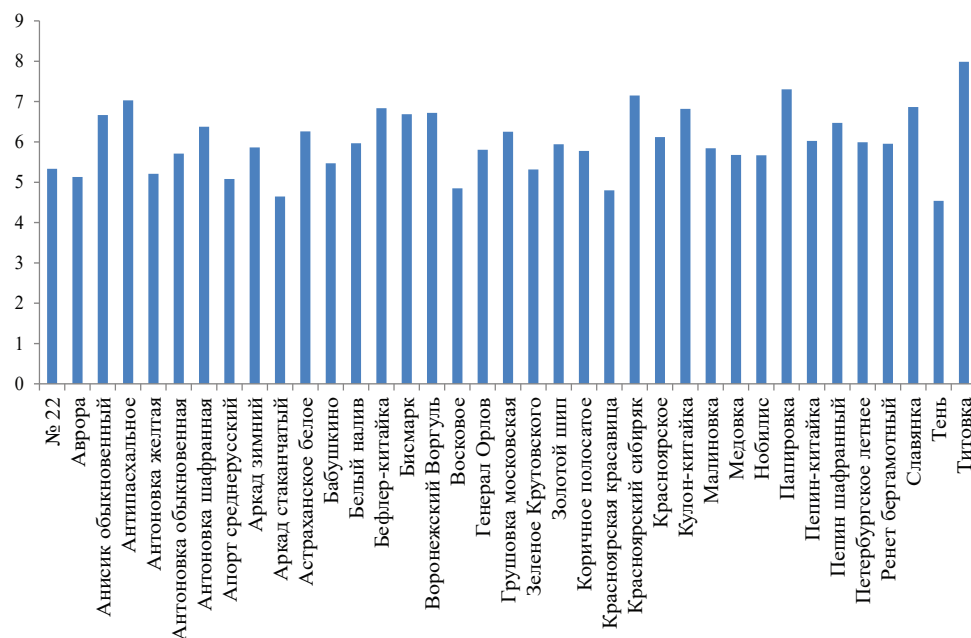


Рис. 3. Площадь листовой пластины, см²

Fig. 3. Leaf plate area, cm²

Статистические показатели модельных сеянцев яблони, взятых для лабораторных анализов в конце вегетационного сезона, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Статистические показатели модельных сеянцев яблони

Table 3

Statistical indicators of model apple tree seedlings

Показатель	\bar{x}	$\pm\sigma$	$\pm m$	V, %	P, %
Количество листьев, шт.	11,20	3,520	0,180	31,5	1,6
Средняя площадь листа, см ²	6,00	1,970	0,100	32,6	1,7
Длина стебля, см	8,90	5,180	0,260	58,4	3,0
Длина корня, см	21,40	4,410	0,220	20,6	1,0
Диаметр корневой шейки, см	0,26	0,065	0,003	24,7	1,3
Масса листа в а.с.с., г	0,11	0,038	0,002	35,7	1,8
Масса 1 см ² листа в а.с.с., мг	6,30	0,760	0,040	12,1	0,6
Масса листьев 1 сеянца в а.с.с., г	0,45	0,254	0,013	56,6	2,8
Масса стебля в а.с.с., г	0,22	0,176	0,009	80,7	4,1
Масса корня в а.с.с., г	0,90	0,460	0,023	51,2	2,6

Был рассчитан показатель LMA, т. е. масса 1 см² листа в а.с.с. У однолетних сеянцев он равен в среднем 6,30±0,04 мг. Отмечена низкая изменчивость (12,1 %) данного показателя.

Установлено, что у однолетних сеянцев в 3-й декаде августа высота и масса надземной части меньше, чем длина и масса корней. Соотношение по протяженности надземной и подземной частей составило 1,0:2,4; по массе в а.с.с. – 1,0:1,3.

При определении внутривидовой изменчивости данных показателей выявлено наличие достоверных различий по массе листа и LMA в зависимости от принадлежности к летним или зимним категориям сортов яблони. Бóльшими показателями массы листа и LMA характеризуются зимние сорта (табл. 4).

Таблица 4

LMA у яблонь разных фенологических форм, мг

Table 4

LMA in apple trees of different phenological forms, mg

Фенологическая форма	\bar{x}	$\pm\sigma$	$\pm m$	V, %	P, %	t_{ϕ} при $t_{05} = 2,04$
Летний сорт	6,1	0,71	0,06	11,7	1,0	3,75
Зимний сорт	6,4	0,77	0,05	12,1	0,8	

Заключение

Изучение динамики роста однолетних сеянцев крупноплодных сортов яблони позволило сделать вывод, что в условиях пригородной зоны г. Красноярска сохранность растений высокая (отпад в течение вегетационного сезона 3,8 %).

Выявлено влияние сортовой принадлежности на рост и развитие сеянцев яблони. Выделены быстрорастущие сорта и отдельные полусибы, характеризующиеся бóльшими высотой и диаметром стволика. По высоте превосходили другие сеянцы сорта Антипасхальное, Анисик обыкновенный, Бабушкино, Малиновка, Пепин шафранный; по диаметру стволика – сеянцы сортов Антипасхальное, Анисик обыкновенный, Воронежский Воргуль, Кулон-китайка, Титовка. Сдержанный рост отмечен у сортов Зеленое Крутовского, Коричное полосатое, Тень. Крупные листья имеют сеянцы сортов Титовка, Папировка, Красноярский сибиряк, Антипасхальное.

При изучении внутривидовой изменчивости показателей сеянцев яблони установлено наличие достоверных различий по массе листа и 1 см² листа в зависимости от принадлежности к летним или зимним категориям сортов. Бóльшими показателями массы листа и LMA характеризуются сеянцы зимних сортов яблони. Полученные результаты позволили выделить перспективные по скорости роста сеянцев сорта, что важно для дальнейших селекционных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Виновец А.Д. Отбор сеянцев яблони на ранних этапах развития // Задачи и современные методы селекции плодовых и ягодных культур. Ереван, 1987. С. 33–35.

Vinovets A.D. Selection of Apple Seedlings at the Early Stages of Development. *Challenges and Modern Breeding Methods Fruit and Berry Crops*. Yerevan, 1987, pp. 33–35. (In Russ.).

2. Дорохин А.Н. Рабочий проект строительства дендропарка в Красноярском мехлесхозе Красноярского края: дендропроект. Т. 1. Новосибирск, 1984. 264 с.
- Dorokhin A.N. *Working Draft for the Construction of an Arboretum in the Krasnoyarsk Mekhleskhoz of Krasnoyarsk Krai: Dendroproject*. Vol. 1. Novosibirsk, 1984. 264 p. (In Russ.).
3. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- Dospikhov B.A. *Field Experiment Procedure*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 351 p. (In Russ.).
4. Журавлева А.В., Сологалов П.В. Корреляция морфологических и хозяйственно ценных признаков сортов яблони полукультурной // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 2. С. 30–32.
- Zhuravleva A.V., Sologalov P.V. Correlation of the Morphological and Economically Valuable Signs of the Varieties of Semi Cultural Apple Tree. *Achievements of Science and Technology of AICis*, 2011, no. 2, pp. 30–32. (In Russ.).
5. Кириллов М.В. Природа Красноярска и его окрестностей. Красноярск: Красноярск. кн. изд-во, 1988. 149 с.
- Kirillov M.V. *Nature of Krasnoyarsk and Its Surroundings*. Krasnoyarsk, Krasnoyarskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1988. 149 p. (In Russ.).
6. Кондратьева Г.В. Результаты селекции семечковых культур в Саратовской области // Вестн. СГАУ. Спец. вып. 2007. С. 53–55.
- Kondrat'yeva G.V. Pome Crops Selection Results in the Saratov Region. *The Bulletin of Saratov State Agrarian University in honor of N.I. Vavilov*, 2007, iss. S, pp. 53–55. (In Russ.).
7. Корко В.С., Городецкая Е.А. Электрофизические методы стимуляции растительных объектов: моногр. Минск: БГАТУ, 2013. 232 с.
- Korko V.S., Gorodetskaya E.A. *Electrophysical Methods of Stimulation of Plant Objects: Monograph*. Minsk, BSATU Publ., 2013. 232 p. (In Russ.).
8. Макаренко С.А. Сорты яблони горноалтайской селекции в сорimente Сибири // Садоводство и виноградарство. 2017. № 6. С. 13–18.
- Makarenko S.A. Apple-Tree Varieties of the Gorno-Altaysk Breeding in the Assortment of Siberia. *Horticulture and viticulture*, 2017, no. 6, pp. 13–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/VSTISP.2017.6.8424>
9. Мамаев С.А. Внутривидовая изменчивость и проблема интродукции древесных растений // Успехи интродукции растений. М.: Наука, 1973. С. 128–140.
- Mamayev S.A. Intraspecific Variability and the Problem of Woody Plant Introduction. *Advances in Plant Introduction*. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 128–140. (In Russ.).
10. Помология: в 5 т. Т. I. Яблоня / под общ. ред. Е.Н. Седова. Орел: ВНИИСПК, 2005. 576 с.
- Pomology: In 5 Vol. Vol. I. Apple Tree*. Ed. by E.N. Sedov. Orel, VNIISPК Publ., 2005. 576 p. (In Russ.).
11. Седов Е.Н. Особенности онтогенеза яблони и интенсификация селекции // Вавилов. журн. генетики и селекции. 2012. Т. 16, № 3. С. 706–715.
- Sedov Ye.N. Apple Tree Development and Intensification of the Breeding Process. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2012, vol. 16, no. 3, pp. 706–715. (In Russ.).
12. Седов Е.Н. Ускорение и интенсификация селекционного процесса у яблони // Плодоводство и ягодоводство России. 2012. Т. 31, № 2. С. 220–229.
- Sedov Ye.N. Apple Tree Selection Process Acceleration and Intensification. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*, 2012, vol. 31, no. 2, pp. 220–229. (In Russ.).
13. Седов Е.Н. Программы, методы, приемы селекции яблони, их развитие и совершенствование // Вавилов. журн. генетики и селекции. 2013. Т. 17, № 3. С. 487–498.
- Sedov E.N. Apple Breeding Programs and Methods: Their Development and Improvement. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2013, vol. 17, no. 3, pp. 487–498. (In Russ.).

14. Седов Е.Н., Жданов В.В., Седышева Г.А., Серова З.М. Учение И.В. Мичурина широко используется и развивается // Вестн. ОрелГАУ. 2006. № 1(1). С. 18–23.
- Sedov E.N., Zhdanov V.V., Sedyшева G.A., Serova Z.M. Michurin I.V. Studies are Widely Used and Evolved. *Bulletin of agrarian science*, 2006, iss. 1(1), pp. 18–23. (In Russ.).
15. Седов Е.Н., Серова З.М., Янчук Т.В., Корнеева С.А. Лучшие зимние сорта яблони селекции ВНИИСПК для производства // Садоводство и виноградарство. 2018. № 6. С. 5–11.
- Sedov E.N., Serova Z.M., Yanchuk T.V., Korneyeva S.A. The Best Winter Apple Varieties of Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding for Production. *Horticulture and viticulture*, 2018, no. 6, pp. 5–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.31676/0235-2591-2018-6-5-11>
16. Dan C., Sestras A.F., Bozdog C., Sestras R.E. Investigation of Wild Species Potential to Increase Genetic Diversity Useful for Apple Breeding. *Genetika*, 2015, vol. 47, iss. 3, pp. 993–1011. <https://doi.org/10.2298/GENSR1503993D>
17. Fischer C. Shortening of the Juvenile Period in Apple Breeding. *Progress in Temperate Fruit Breeding*. Ed. by H. Schmidt, M. Kellerhals. Dordrecht, Springer, 1994, pp. 161–164. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0467-8_32
18. Flachowsky H., Hanke M.-V., Peil A., Strauss S.H., Fladung M. A Review on Transgenic Approaches to Accelerate Breeding of Woody Plants. *Plant Breeding*, 2009, vol. 128, iss. 3, pp. 217–226. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2008.01591.x>
19. Flachowsky H., Le Roux P.-M., Peil A., Patocchi A., Richter K., Hanke M.-V. Application of a High Speed Breeding Technology to Apple (*Malus × domestica*) Based on Transgenic Early Flowering Plants and Marker-Assisted Selection. *New Phytologist*, 2011, vol. 192, iss. 2, pp. 364–377. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03813.x>
20. Hanke M.-V., Flachowsky H., Peil A., Hättasch C. No Flower no Fruit – Genetic Potentials to Trigger Flowering in Fruit Trees. *Genes, Genomes and Genomics*, 2007, vol. 1(1), pp. 1–20.
21. Le Roux P.-M., Flachowsky H., Hanke M.-V., Gessler C., Patocchi A. Use of a Transgenic Early Flowering Approach in Apple (*Malus × domestica* Borkh.) to Introgress Fire Blight Resistance from Cultivar Evereste. *Molecular Breeding*, 2012, vol. 30, iss. 2, pp. 857–874. <https://doi.org/10.1007/s11032-011-9669-4>
22. Yamagishi N., Kishigami R., Yoshikawa N. Reduced Generation Time of Apple Seedlings to Within a Year by Means of a Plant Virus Vector: A New Plant-Breeding Technique with no Transmission of Genetic Modification to the Next Generation. *Plant Biotechnology Journal*, 2014, vol. 12, iss. 1, pp. 60–68. <https://doi.org/10.1111/pbi.12116>
23. Yamagishi N., Sasaki S., Yamagata K., Komori S., Nagase M., Wada M., Yamamoto T., Yoshikawa N. Promotion of Flowering and Reduction of a Generation Time in Apple Seedlings by Ectopical Expression of the *Arabidopsis thaliana FT* Gene Using the *Apple Latent Spherical Virus* Vector. *Plant Molecular Biology*, 2011, vol. 75, iss. 1-2, pp. 193–204. <https://doi.org/10.1007/s11103-010-9718-0>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 630*181.7:630*271:630*232.11(571.513)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-73-90

Продолжительность жизненного цикла и зимостойкость древесных интродуцентов в сухостепной зоне Хакасии

Г.Н. Гордеева[✉], канд. биол. наук; ResearcherID: [AAH-2491-2021](https://orcid.org/0000-0002-9225-3659),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9225-3659>

А.И. Лобанов, канд. биол. наук; ResearcherID: [ABB-8764-2020](https://orcid.org/0000-0003-0505-8212),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0505-8212>

Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии, ул. Садовая, д. 5, с. Зеленое, Усть-Абаканский р-н, Республика Хакасия, Россия, 655132; gordeeva.gal2011@yandex.ru[✉], anatoly-lobanov@ksc.krasn.ru

Поступила в редакцию 20.05.20 / Одобрена после рецензирования 30.08.20 / Принята к печати 02.09.20

Аннотация. В Сибири интродукцией древесных растений начали заниматься с середины XVIII в. Перед нами стояла цель – определение лимитирующих факторов, влияющих на продолжительность жизни и зимостойкость интродуцентов различного географического происхождения в сухостепной зоне Республики Хакасии. Объектами исследований стали растения разного географического происхождения и возраста, произрастающие в однородных условиях дендрария Института аграрных проблем Хакасии. В ходе многолетних исследований установлены растения с наибольшей продолжительностью жизни из флоры Сибири – *Larix sibirica* Ledeb., *Pinus sylvestris* L., *Caragana frutex* (L.) С. Koch.; из флор других регионов – деревья *Pyrus ussuriensis* Maxim., *Crataegus maximowiczii* Schneid., *Salix babylonica* L., *Larix leptolepis* (Sieb. & Zucc.) Gord., *Morus alba* L., *Acer Semenovii* Rgl. et Herd., *A. tataricum* L., *Fraxinus lanceolata* Borkh., *A. negundo* L. и кустарники *Corylus heterophylla* Fisch. ex Trautv., *Berberis tibetica* Schneid., *B. sphaerocarpa* Kar. et Kir., *Philadelphus caucasicus* Koehne, *Syringa Josikaea* Jacq., *S. vulgaris* L., *Eleagnus argentea* Pursh. Наибольшее количество зимостойких видов имеют сибирское (80 %) и дальневосточное (60 % из них – зимостойкие) происхождение. Выявлены основные лимитирующие факторы, влияющие на продолжительность жизни сибирских растений: их низкая зимостойкость и несоответствие эдафических условий биологии видов; для инорайонных видов – кроме перечисленных выше, низкая атмосферная влажность воздуха в период цветения и раннее завершение жизненного цикла. Установлена зависимость устойчивости растения в засушливых условиях от его принадлежности к географическому региону и экологической группе. Наиболее адаптированными к местным условиям сухостепной зоны Республики Хакасии оказались представители сибирской и дальневосточной флоры.

Ключевые слова: дендрарий, интродуценты, древесные растения-интродуценты, кустарниковые растения-интродуценты, засушливые условия, зимостойкость, продолжительность жизни, Республика Хакасия, устойчивость

Для цитирования: Гордеева Г.Н., Лобанов А.И. Продолжительность жизненного цикла и зимостойкость древесных интродуцентов в сухостепной зоне Хакасии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 73–90. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-73-90>

Original article

Life Expectancy and Winter Hardiness of Introduced Woody Plants in the Dry-Steppe Zone of Khakassia

Galina N. Gordeeva[✉], Candidate of Biology; ResearcherID: [AAH-2491-2021](https://orcid.org/0000-0002-9225-3659),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9225-3659>

Anatoly I. Lobanov, Candidate of Biology; ResearcherID: [ABB-8764-2020](https://orcid.org/0000-0003-0505-8212),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0505-8212>

Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia, ul. Sadovaya, 5, s. Zelenoye, Ust-Abakansky District, Republic of Khakassia, 655132, Russian Federation; gordeeva.gal2011@yandex.ru[✉], anatoly-lobanov@ksc.krasn.ru

Received on May 20, 2020 / Approved after reviewing on August 30, 2020 / Accepted on September 2, 2020

Abstract. The introduction of woody plants began in Siberia in the middle of the 18th century. We aimed at determining the limiting factors affecting the life expectancy and winter hardiness of introduced plants of different geographical origin in the dry-steppe zone of the Republic of Khakassia. The research objects were plants of different geographical origin and age, growing in the arboretum of the Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia. Long-term studies have identified the plants with the highest life expectancy from the flora of Siberia, such as *Larix sibirica* Ledeb., *Pinus sylvestris* L., *Caragana frutex* (L.) C. Koch.; trees from the flora of other regions, such as *Pyrus ussuriensis* Maxim., *Crataegus maximowiczii* Schneid., *Salix babylonica* L., *Larix leptolepis* (Sieb. et Zucc.) Gord., *Morus alba* L., *Acer Semenovii* Rgl. et Herd., *A. tataricum* L., *Fraxinus lanceolata* Borkh., *A. negundo* L. and shrubs, such as *Corylus heterophylla* Fisch. ex Trautv., *Berberis tibetica* Schneid., *B. sphaerocarpa* Kar. et Kir., *Philadelphus caucasicus* Koehne, *Syringa Josikaea* Jacq., *S. vulgaris* L., *Eleagnus argentea* Pursh. The majority of winter-resistant species are of Siberian (80 % of them are hardy) and Far Eastern (60 %) origin. The main limiting factors affecting the life expectancy of Siberian plants are found: low winter hardiness and non-compliance of edaphic conditions with the biology of the studied species; for non-regional species (in addition to the above mentioned) – low atmospheric humidity during flowering and early completion of the life cycle. The dependence of plant resistance in dry conditions on its geographical origin and ecological group has been found. The most adapted to local conditions of the dry-steppe zone of the Republic of Khakassia were representatives of Siberian and Far East flora.

Keywords: arboretum, introduced woody plants, introduced shrubs, dry conditions, winter hardiness, life expectancy, Republic of Khakassia, sustainability

For citation: Gordeeva G.N., Lobanov A.I. Life Expectancy and Winter Hardiness of Introduced Woody Plants in the Dry-Steppe Zone of Khakassia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 3, pp. 73–90. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-73-90>

Введение

Каждое растение характеризуется определенным жизненным циклом (онтогенезом). В рамках изучения закономерностей эволюции онтогенеза и реализации его жизненной программы важна конкретизация такого важного вопроса, как старение растений [16, 18, 21, 27].



Продолжительность жизни является косвенным индикатором благополучия вида. О пределах выносливости вида мы можем судить по его ареалу и норме реакции на изменения условий существования. Под долголетием видов нами понимается их максимальная продолжительность жизни. Вопрос долголетия древесных пород мало исследован. Ученые работали в основном в области изучения продуктивности и стабильного развития древесных ценозов до наступления возраста биологической спелости [2, 8, 9]. Проблема устойчивости древесных насаждений в селитебных территориях актуальна как в России, так и за рубежом [17, 20, 22, 24, 26]. Под устойчивостью растения подразумевается его способность возвратиться после отрицательного воздействия внешних факторов в состояние динамического равновесия [4].

Периодические и ритмические явления у растений рассматриваются как показатели устойчивости [6]. Такие явления разнообразны и специфичны для организмов разных популяций и видов, оказываются результатом взаимодействия внутренних и внешних факторов, проявляются морфологически, физиологически, биохимически и представляют собой реакцию генотипа на экологические условия [3, 10, 19, 23, 25, 26].

Лесные насаждения в степи – массивы и полосы, искусственно созданные в исконно безлесных биотопах, всегда растут в «несвойственных виду условиях», но не всегда бывают ослаблены. Когда дерево страдает от дефицита влаги, повышается концентрация клеточного сока в тканях, прежде всего в верхней части кроны, и происходит отмирание по вершинному типу [10]. Факторами, уменьшающими продолжительность жизни растений в сухой степи, являются засушливость климата (малое количество осадков), засоленность грунтовых вод и почвы, резкие перепады суточных температур в переходные периоды года (весна, осень).

Цель исследования – установление лимитирующих факторов, влияющих на продолжительность жизни и зимостойкость древесных интродуцентов различного географического происхождения в сухостепной зоне Республики Хакасии.

В задачи исследования входило оценить продолжительность жизни древесных интродуцентов и их зимостойкость в жестких условиях сухостепной зоны, выявить флористическую область наиболее адаптированных к местным условиям древесных растений-интродуцентов.

Объекты и методы исследования

Объектом изучения стали растения разных географических происхождений и возраста, произрастающие в дендрарии Института аграрных проблем Хакасии, находящемся в с. Зеленом Усть-Абаканского района Республики Хакасии. Площадь дендрария – 1,1 га. Он расположен на второй надпойменной террасе р. Абакан в сухостепной зоне. Дендрарий был заложен Н.И. Лиховид в 1975 г. Большинство растений выращено из семян, полученных по делектусам из других ботанических садов и дендрариев России и ближнего зарубежья. Часть семян привезена из экспедиционных поездок, другую часть перенесли из старого дендрария, который подвергся подтоплению грунтовыми водами. Местоположение растений – объектов исследований – совпадало с маршрутом проведения фенологических наблюдений.

Район Приабаканской степи, где расположен дендрарий, характеризуется резко континентальным климатом с очень холодной зимой и жарким летом, с возвратными весенними заморозками и ранними заморозками (до -5°C) осенью. В июле температура воздуха может достигать $+38^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности воздуха 5–7 %. Для мая характерны сильные ветра, до 30 м/с. Годовое количество осадков – 300 мм. Снеговой покров – не выше 23–25 см, в отдельные годы – 3–5 см, что вызывает глубокое промерзание почвы (до 3 м) [1]. В пункте интродукции наблюдается близкое залегание грунтовых вод (3–4 м) плохого качества (гидрокарбонатно-сульфатно-натриевый класс воды) [11]. Растения выращиваются при поливе водопроводной водой.

Фенологические наблюдения за древесными растениями проводились по общепринятым методикам [12, 13], экологическая приуроченность определялась по Н.И. Лиховид [11], естественное возобновление – по методике А.И. Лобанова и Г.Н. Гордеевой [12], зимостойкость – по методике П.И. Лапина с соавт. [8]. Латинские названия растений приведены в соответствии со сводкой С.К. Черепанова [15] и книгой «Деревья и кустарники СССР» [5]. Процент отмерших побегов устанавливался посредством натуральных наблюдений, визуально.

Результаты исследования и их обсуждение

Изучение процессов роста и фенологического развития имеет важное значение в теории и практике выращивания растений в условиях интродукции [22, 23]. В дендрарии проходят испытание растения из 6 регионов Земли: Европы, Средней и Восточной Азии, Сибири, с Дальнего Востока и из Северной Америки. Известно, что в условиях жаркого и сухого климата деревья и кустарники быстро растут, раньше вступают в генеративную стадию, но и сравнительно быстро стареют и завершают свой жизненный цикл [14]. Это характерно и для растений-интродуцентов в дендрарии. В коллекции по маршруту исследований насчитывается 274 вида деревьев, кустарников и древесных лиан.

Сибирские виды. Проводятся наблюдения за 55 видами сибирской флоры (20 %). Деревья (21 вид) имеют средний возраст $49,5 \pm 3$ лет, с вариацией от 28 (*Betula tortuosa* Ledeb.) до 74 лет (*Larix sibirica* Ledeb., *Pinus sylvestris* L.). У *L. sibirica* выявлено 15 % отмерших побегов, что является самым высоким показателем среди голосеменных растений. Лиственные породы стареют быстрее. Так, *Alnus incana* (L.) Moench суховершинит, имея 80–90 % отмерших ветвей. *Sorbus sibirica* Hedl. в возрасте 48 лет закончила свой жизненный цикл (табл. 1, 2). Самосев является результирующим показателем адаптации вида к новым условиям произрастания [12]. Из 21 вида деревьев, представителей сибирской флоры, 12 дают самосев (57 %), цветут и плодоносят.

Средний возраст аборигенных кустарников (30 видов) – $41,4 \pm 2$ года, а более молодых: *Myricaria bracteata* Royle, *Cerasus fruticosa* Pall. – от 11 до 15 лет. Старовозрастные виды – *Caragana frutex* (L.) C. Koch., *Salix ledebouriana* f. *kuraica* пом. пов. – достигли 59 и 60 лет. Наибольшим процентом отмерших побегов (80 %) характеризуется *Spiraea trilobata* L. – редкий вид [7]. Она практически усохла, достигнув 45 лет. На 37-й год полностью погибла *C. arborescens* f. *Lorbergii* Koechne. Для 26 % кустарников аборигенной флоры характерен самосев в условиях дендрария. Из них 90 % цветет, а плодоносит только 60 %.

В дендрарии выращивается 4 вида лиан сибирской флоры: *Atragene sibirica* L., *A. ochotensis* Pall., *Menispermum dauricum* DC. и *Clematis glauca* Willd. Активно цветет и плодоносит *A. ochotensis* в возрасте 12 лет. Самосева у нее нет. Для 2 других лиан определить возраст практически невозможно, т. к. на одной территории могут произрастать как материнские растения, так и цветущий и плодоносящий подрост этих же видов. На одном месте они могут располагаться 30 и более лет.

Зимостойкость древесных растений входит в число основных критериев успешности интродукции [11]. Наивысшим (I) баллом зимостойкости характеризуются 80,0 % древесных растений Сибири, II баллом – 18,2 %, VI балл присвоен 1,8 % видов (*M. dauricum* DC.).

Рассматриваемые растения сибирской флоры относятся к 9 экологическим группам. Наибольшее количество видов – это мезоксерофиты (32,7 %), ксерофиты (25,4 %) и мезофиты (23,6 %), остальные представлены единично. По результатам многолетних наблюдений установлено, что основными лимитирующими факторами, влияющими на продолжительность жизни растений сибирской флоры, являются их низкая зимостойкость и несоответствие эдафических условий биологии вида.

Дальневосточные виды. В коллекции есть 75 видов с Дальнего Востока (27,4 %): 35 деревьев, 33 кустарника и 7 лиан (табл. 1, 2). Из числа деревьев наибольшая продолжительность жизни отмечена у *Pyrus ussuriensis* Maxim., *Crataegus Maximowiczii* Schneid., *Rhamnus davurica* Pall. и *Phellodendron sachalinense* (Fr. Schmidt) Sarg. *P. sachalinense* имеет 60 % отмерших побегов, *Pyrus ussuriensis* – 35, *C. maximowiczii* – 20, *R. davurica* – 5 %. У *R. davurica* в условиях дендрария самосев обильен (до 120 экз./м²), у *Pyrus ussuriensis* – единичный, у *Phellodendron sachalinense* и *C. maximowiczii* отсутствует.

Дальневосточные деревья в 33,3 % случаев имеют возраст 47–48 лет. Процент отмерших побегов варьирует от 15 до 25 %. Самосев наблюдается у 22,2 % видов, цветут – 80,5 %, плодоносят – 75,0 %. *Juniperus rigida* Sieb. et Zucc. и *Tilia mandshurica* Rupr. цветут, но семян не формируют. Причин этого явления может быть несколько: низкая относительная влажность и высокие температуры воздуха, сильные иссушающие ветры в период цветения. Нецветущих растений у дальневосточных древесных видов насчитывается 19,4 %. Много самосева зафиксировано у *Acer mono* Maxim., *Ulmus macrocarpa* Hance, *Armenica mandshurica* (Maxim.) Skvorts. [12].

Среди дальневосточных кустарников самосев отмечен у 25,7 % видов, цветение – у 88,5 %, плодоношение – у 62,8 %. В силу возраста не цветут 3 вида – *Kalopanax septemlobus* (Thunb.) Koidz. (48 лет), *Cerasus sachalinensis* (Fr. Schmidt) Kom. (43 года) и *Lonicera tolmachevii* Pojark. (39 лет).

Семь видов лиан Дальнего Востока имеют средний возраст 43 года. Цветут 57,1 % видов, плодоносят – 61,9 %. Самосев отмечен у 42,8 %. Три вида лианы не цветут: *Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill., *Celastrus orbiculata* Thunb., *Parthenocissus tricuspidata* (Sieb. & Zucc.) Planch. Основная причина – несоответствие условий произрастания (затенение, сухость воздуха, эдафические условия) биологии видов.

Большая часть (60 %) дальневосточных видов зимостойка (I балл) в условиях дендрария, II баллом характеризуются 34,6 % из них, III – 4,1 %, VI – 1,3 %. В экологическом отношении 70,5 % коллекции дальневосточных растений яв-

ляются мезофитами. На долю мезоксерофитов приходится 17,9 %, остальные экологические группы представлены единично (6 групп).

Для дальневосточных растений выявлены основные лимитирующие факторы роста и развития: низкая зимостойкость видов, сухость воздуха в период цветения и несоответствие эдафических условий биологии растений.

Восточноазиатские виды. Флора Восточной Азии в дендрарии представлена 44 видами (16,0 %). Из них 13 – деревья, 29 – кустарники и 2 – лианы (табл. 1, 2). Средний возраст деревьев составляет $46,6 \pm 2$ года и варьирует от 39 (*Ulmus parvifolia* Jacq.) до 57 лет (*Salix babylonica* L.). У остальных видов возраст достигает 42–44 лет. Максимальный процент отмерших побегов наблюдался у *Sorbus pohuashanensis* (Hance) Hedl., она суховершинит, заканчивая свой жизненный цикл. Также высокая доля отмерших побегов в кронах деревьев отмечена у *Salix babylonica*. Остальные виды характеризуются этим показателем в диапазоне от 15 до 35 %. Самосев наблюдается у *Ulmus parvifolia* и *Phellodendron japonica* Maxim. Цветут 76,9 % деревьев, плодоносят – 69,2 %, не цветут – 15,3 %.

Из числа кустарников долгожителями являются *Berberis tibetica* Schneid., *Syringa Sweginzowii* Koehne et Lingelsh., *S. velutina* Kom., их средний возраст составляет $44,2 \pm 0,7$ года. Процент отмерших побегов варьирует от 15 до 80 %. В возрасте 45 лет *B. Poiretii* С.К. Schneid образует мощные черные побеги. После прочистки кустов у него появились молодые побеги с ежегодным приростом до 20 см. Разные виды на 46–47-й год имеют 40–45 % отмерших побегов.

У 31 % восточноазиатских кустарников отмечен самосев (барбарисы, сирени, *Forsythia ovata* Nakai). Большинство цветет (89,6 %) и плодоносит (75,8 %). Цветут, но не завязывают плодов 13,7 % видов: *Amygdalus triloba* (Lindl.) Rickert., *A. triloba f. plena* Dipp., *Spiraea japonica* L. f. – что связано не только с возрастом растений, но и с их происхождением.

Лиана *Clematis paniculata* Thunb. ежегодно обмерзает до корневой шейки и ежегодно отрастает. Обильно цветет многочисленными некрупными белыми ароматными цветками, плодоношение ежегодное, сорничает. В возрасте 37 лет закончил свой жизненный цикл *Ampelopsis aconitifolia* Vge.

Большинство представителей (59 %) древесной флоры данного региона характеризуются II баллом зимостойкости. У растений обмерзают концы побегов ежегодного прироста. I балл зимостойкости присвоен 25,0 % видов, III балл – 13,7 %, VI балл – 2,3 %.

Для 12 видов флоры Восточной Азии: *Cerasus tomentosus* (Thunb.) Wall., *Lonicera demissa* Rhed., *Weigela florida* (Bge.) A. DC., *Cotoneaster Zabelii* С. К. Schneid. и др. – установлена экологическая приуроченность. Они относятся к мезофитам (66,8 %), мезоксерофитам и ксерофитам (по 16,6 %). Выявлены основные факторы, препятствующие успешной интродукции этой группы растений: низкая зимостойкость и раннее естественное завершение у них жизненного цикла из-за несвойственных для вида экологических условий.

Среднеазиатские виды. Представителей флоры Средней Азии, за которыми проводятся наблюдения, насчитывается 21 вид (7,8 %): 10 деревьев, 9 кустарников и 2 лианы. В среднем возраст деревьев составил $42,2 \pm 2,6$ года, с нижним пределом у *Ulmus pumila* L. (37 лет). Наиболее возрастным (48 лет) из лиственных деревьев является *Acer Semenovii* Regel. et Herd. У него отмечено максимальное количество отмерших побегов – 35 %. Минимальное их количество – у *Picea Schrenkiana* Fisch. et С.А. Mey. и *Armeniaca vulgaris* Lam. (табл. 1, 2). Самосев наблюдался у 3 видов: *U. pumila* (обильно), *Malus Niedzwetzkyana* Dieck и *A. vulgaris* (единично). Цветут и плодоносят 90 % видов.

Таблица 1

Продолжительность жизни и биологическая характеристика древесных и кустарниковых растений-интродуцентов разного географического происхождения в сухой степи Республики Хакасии

Table 1

Life expectancy and biological characteristic of introduced woody and shrubby plants of different geographical origin in the dry steppe of the Republic of Khakassia

Вид	А	ОП/З	ЭГ	С	Ц, П	Вид	А	П/З	ЭГ	С	Ц, П
Деревья						Кустарники					
<i>Сибирские виды</i>											
<i>Picea obovata</i>	49	10/I	М	+	+,+	<i>Juniperus sabina</i>	47	45/I	К	-	-, -
<i>P. obovata f. glauca</i>	59	8/I	М	-	+,+	<i>Salix ledebouriana f. kuraica</i>	59	60/I	М	-	+, -
<i>Larix cajanderi</i>	44	10/I	МК	-	+,+	<i>Grossularia acicularis</i>	45	45/I	К	-	+, -
<i>L. czekanowskii</i>	45	12/I	МК	-	+,+	<i>Spiraea betulifolia</i>	44	-/I	МК	-	+, -
<i>L. gmelinii</i>	54	10/I	МК	+	+,+	<i>S. chamaedrifolia</i>	48	30/I	МК	-	+, +
<i>L. sibirica</i>	74	15/I	МК	+	+,+	<i>S. crenata</i>	45	35/II	К	-	+, +
<i>Pinus sibirica</i>	51	3/I	М	+	+,+	<i>S. media</i>	46	35/I	МК	-	-, -
<i>P. sylvestris</i>	74	5/I	МК	-	+,+	<i>S. salicifolia</i>	48	60/I	Г	-	-, -
<i>Alnus incana</i>	47	80/I	М	-	+,+	<i>S. trilobata</i>	45	80/I	К	-	+, +
<i>Ulmus pumila</i>	64	20/II	К	+	+,+	<i>Sibiraea laevigata</i>	25	5/I	М	-	+, -
<i>Malus baccata</i>	44	30/I	М	+	+,+	<i>Sorbaria sorbifolia</i>	45	30/I	МГ	-	+, +
<i>Sorbus sibirica</i>	48	70-90/I	М	+	+,+	<i>Cotoneaster lucidus</i>	48	10/I	К	+	+, +
<i>Crataegus dahurica</i>	44	25/I	КМ	-	+,+	<i>C. megalocarpus</i>	48	65/I	КПТ	-	+, +
<i>Padus avium</i>	45	35/I	М	+	+,+	<i>C. melanocarpus</i>	45	30/I	К	+	+, +
<i>Tilia sibirica</i>	36	20/II	М	+	+,+	<i>Rosa acicularis</i>	45	40/I	МК	-	+, +
<i>Betula pendula</i>	45	3/I	МК	+	+,+	<i>Amygdalus nana</i>	45	45/II	К	-	+, +
<i>B. tortuosa</i>	28	3/I	МПС	-	+,+	<i>A. pedunculata</i>	42	25/II	К	-	+, -
<i>B. pubescens</i>	37	10/I	М	-	+, -	<i>Cerasus fruticosa</i>	15	45/II	МК	-	+, +
<i>B. microphylla</i>	45	10/I	КГ	-	+, -	<i>Sorbocotoneaster pozdnyakovii</i>	34	20/I	МК	-	+, +
<i>Armeniaca sibirica</i>	32	-/II	К	+	-, -	<i>Caragana altaica</i>	41	30/I	К	-	+, -

Продолжение табл. 1

Вид	А	ОП/З	ЭГ	С	Ц, П	Вид	А	П/З	ЭГ	С	Ц, П
Деревья						Кустарники					
<i>Rhamnus catharica</i>	45	15/І	МК	+	+,+	<i>C. arborescens</i>	45	20/І	К	+	+,+
						<i>C. frutex</i>	60	25/І	К	+	+,+
						<i>C. jubata</i>	30	15/І	МПС	-	+,-
						<i>Rhamnus parvifolia</i>	45	20/І	К	+	+,+
						<i>Myricaria bracteata</i>	11	20/ІІ	МГ	-	+,+
						<i>Rhododendron ledebourii</i>	32	20/І	МК	-	+,-
						<i>Viburnum opulus</i>	45	35/І	М	+	+,+
						<i>Lonicera altaica</i>	44	35/І	МК	+	+,+
						<i>L. tatarica</i>	45	35/І	МК	+	+,+
Дальневосточные виды											
<i>Abies nephrolepis</i>	34	65/І	М	-	-,-	<i>Juniperus sargentii</i>	45	20/І	КМ	-	+,-
<i>A. sachalinensis</i>	38	20/І	М	-	-,-	<i>Corylus mandshurica</i>	45	25/І	М	-	+,-
<i>Juniperus rigida</i>	43	13/І	КМ	-	+,-	<i>Corylus heterophylla</i>	50	45/ІІ	МК	-	+,-
<i>Populus davidiana</i>	47	20/І	М	+	+,+	<i>Berberis amurensis</i>	48	30/І	М	+	+,+
<i>Juglans mandshurica</i>	36	-/І	МГ	-	-,-	<i>Philadelphus schrenkii</i>	46	55/ІІ	М	-	+,+
<i>Betula davurica</i>	48	30/І	М	-	+,+	<i>Deutzia glabrata</i>	48	35/ІІ	М	-	+,+
<i>B. ermanii</i>	48	45/І	М	-	+,+	<i>D. parviflora</i>	46	45/ІІ	М	-	+,+
<i>B. maximowicziana</i>	42	20/І	М	-	+,+	<i>D. amurensis</i>	8	15/ІІ	М	-	+,+
<i>B. ovalifolia</i>	45	20/І	М	-	+,+	<i>Hydrangea paniculata</i>	35	45/ІІ	М	-	+,-
<i>Quercus mongolica</i>	42	8/І	МК	-	-,-	<i>Ribes mandshuricum</i>	46	35/І	МГ	-	+,-
<i>Ulmus japonica</i>	48	25/ІІ	МК	-	-,-	<i>Physocarpus amurensis</i>	47	55/ІІ	МК	-	+,+
<i>U. laciniata</i>	47	20/ІІ	М	-	+,+	<i>P. ribesifolia</i>	45	45/ІІ	К	-	+,+
<i>U. macrocarpa</i>	43	15/ІІ	МК	+	+,+	<i>Spiraea ussuriensis</i>	48	20/І	МК	+	+,+
<i>Pyrus ussuriensis</i>	74	35/І	М	+	+,+	<i>Rosa gracilipes</i>	46	45/І	К	-	+,+

Продолжение табл. 1

Вид	А	ОП/З	ЭГ	С	Ц, П	Вид	А	П/З	ЭГ	С	Ц, П
Деревья						Кустарники					
<i>Malus sachalinensis</i>	47	25/I	М	-	+,+	<i>Cerasus sachalinensis</i>	43	-/I	М	-	+,+
<i>Sorbus amurensis</i>	48	15/I	М	-	+,+	<i>Prinsepia sinensis</i>	46	30/I	М	+	+,+
<i>S. kamtschaticensis</i>	46	25/I	М	-	+,+	<i>Securinega suffruticosa</i>	46	-/II	К	-	+,+
<i>Crataegus chlorosarca</i>	47	15/I	М	-	+,+	<i>Euonymus maackii</i>	36	-/I	МК	-	+,+
<i>C. maximowiczii</i>	60	20/I	М	-	+,+	<i>E. pauciflora</i>	48	20/I	М	-	+,+
<i>C. pinnatifida</i>	47	23/I	М	-	+,+	<i>E. sacrosancta</i>	48	10/I	МК	-	+,+
<i>Padus maackii</i>	41	80-45/I	М	-	+,+	<i>Eleutherococcus senticosus</i>	46	8/II	М	-	+,+
<i>P. ssiori</i>	39	15/III	М	-	+,+	<i>E. sessiliflorus</i>	48	15/I	МК	-	+,-
<i>Armeniaca mandshurica</i>	47	20/II	МК	+	+,+	<i>Syringa amurensis</i>	48	25/I	М	+	+,+
<i>Maackia amurensis</i>	32	30/I	М	-	+,+	<i>S. wolfei</i>	46	15/I	М	-	+,+
<i>Phellodendron amurense</i>	42	15/II	М	-	+,+	<i>Sambucus latipinna</i>	-	80/II	М	+	+,+
<i>P. sachalinense</i>	56	60/II	М	-	+,+	<i>Viburnum burejaeticum</i>	48	35/I	М	+	+,+
<i>Acer ginnala</i>	33	20/I	М	+	+,+	<i>V. sargentii</i>	48	25/I	М	+	+,+
<i>A. mandshuricum</i>	48	25/I	М	-	+,+	<i>Abelia coreana</i>	48	40/I	М	-	+,-
<i>A. mono</i>	48	20/II	М	+	+,+	<i>Lonicera chamissoi</i>	38	35/II	МК	+	+,+
<i>Rhamnus davurica</i>	57	5/I	М	+	+,+	<i>L. ruprechtiana</i>	46	25/I	М	-	+,+
<i>Tilia amurensis</i>	46	10/I	М	-	+,+	<i>L. tolmatchevii</i>	39	35/I	Г	-	+,+
<i>T. mandshurica</i>	48	15/I	М	-	+,-	<i>Weigela praecox</i>	28	-/II	М	-	+,+
<i>T. pekinensis</i>	37	3/I	М	-	-,-						
<i>T. taguetii</i>	48	5/I	М	+	+,+						
<i>Fraxinus rhynchophylla</i>	48	15/II	М	-	-,-						
Восточноазиатские виды											
<i>Picea asperata</i>	49	20/II	М	-	+,+	<i>Paeonia arborea</i>	43	80/III	М	-	+,+
<i>Larix leptolepis</i>	56	15/II	МК	-	++	<i>Berberis Francisci-Ferdinandii</i>	45	45/II	-	+	+,+
<i>Juniperus chinensis</i>	43	30/II	К	-	+,+	<i>B. Poiretii</i>	45	65/II	-	-	+,+

Продолжение табл. 1

Вид	А	ОП/З	ЭГ	С	Ц, П	Вид	А	П/З	ЭГ	С	Ц, П
Деревья						Кустарники					
<i>Salix babylonica</i>	57	35–40/III	–	–	+, –	<i>B. tibetica</i>	55	45/II	–	+	+, +
<i>Betula potanini</i>	44	35/I	М	–	–, –	<i>Philadelphus Magdalenaе</i>	39	35/II	–	–	+, +
<i>Ulmus parvifolia</i>	39	15/II	К	+	+, +	<i>Spiraea albiflora</i>	45	35/II	М	+	+, +
<i>Morus alba</i>	55	30/II	М	–	+, +	<i>S. expansa</i>	46	45/II	–	–	+, +
<i>Malus floribunda</i>	43	35/I	М	–	+, +	<i>S. gemmata</i>	46	30/II	–	–	+, +
<i>Sorbus pohuashanensis</i>	43	65/I	–	–	–, –	<i>S. japonica f.</i>	43	35/II	МК	–	+, –
<i>Padus grayana</i>	44	30/I	–	–	+, +	<i>S. nipponica</i>	47	40/II	М	–	–, –
<i>Phellodendron chinense</i>	42	35/II	–	–	–, –	<i>Spiraea trichocarpa</i>	46	35/II	–	–	+, +
<i>P. japonicum</i>	44	20/III	–	+	+, +	<i>S. Wilsonii</i>	45	30/II	–	–	+, +
<i>Euonymus Bungeana</i>	47	15/I	–	–	+, +	<i>Sorbaria arborea</i>	38	45/II	–	–	+, +
						<i>S. Lindleyana</i>	37	–/III	–	–	–, –
						<i>Cotoneaster divaricatus</i>	46	40/III	–	–	+, +
						<i>C. foveolata</i>	45	35/I	–	–	+, +
						<i>C. Zabelii</i>	35	40/III	–	–	+, +
						<i>Amygdalus triloba</i>	42	35/II	–	–	+, –
						<i>A. triloba f. plena</i>	42	40/II	–	–	+, –
						<i>Eleutherococcus Henryi</i>	39	25/I	–	–	–, –
						<i>Forsythia ovata</i>	47	35/II	–	+	+, +
						<i>Syringa oblata</i>	42	30/II	–	+	+, +
						<i>S. pekinensis</i>	45	40/II	–	–	+, –
						<i>S. Sweginzowii</i>	49	35/I	М	+	+, +
						<i>S. tomentella</i>	48	35/I	–	+	+, +
						<i>S. velutina</i>	49	25/I	–	+	+, +
						<i>S. villosa</i>	46	15/I	М	+	+, +
						<i>S. yunnanensis</i>	46	35/II	–	–	+, +
						<i>Lonicera tangutica</i>	41	30/II	–	–	+, +
Среднеазиатские виды											
<i>Picea Schrenkiana</i>	41	15/I	М	–	–, –	<i>Spiraea lasiocarpa</i>	45	30/II	М	–	+, +

Продолжение табл. 1

Вид	А	ОП/З	ЭГ	С	Ц, П	Вид	А	П/З	ЭГ	С	Ц, П
Деревья						Кустарники					
<i>Betula tianschanica</i>	41	35/III	–	–	+,+	<i>Cotoneaster songoricus</i>	42	15/I	М	–	+,+
<i>B. turkestanica</i>	39	20/II	–	–	+,+	<i>Rosa Fedtschenkoana</i>	42	40/II	МК	–	+,–
<i>Malus Niedzwetzkyana</i>	46	15/I	МК	+	+,+	<i>Euonymus Koopmannii</i>	45	5/II	М	–	+,–
<i>Sorbus tianschanica</i>	43	30/II	М	–	+,+	<i>Tamarix laxa</i>	22	45/III	КМ	–	+,+
<i>Crataegus almaatensis</i>	42	20/I	МК	–	+,+	<i>Berberis sphaerocarpa</i>	53	30/II	М	+	+,+
<i>C. chlorocarpa</i>	39	20/I	–	–	+,+	<i>Lonicera Alberti</i>	27	30/II	МК	–	+,–
<i>Ulmus pumila</i>	37	20/II	МК	+	+,+	<i>L. stenantha</i>	46	35/I	М	–	+,+
<i>Acer Semenovii</i>	48	35/II	М	–	+,+						
<i>Armeniaca vulgaris</i>	46	15/II	МК	+	+,+						
Европейские виды											
<i>Betula oycoviensis</i>	44	20/I	–	–	+,+	<i>Philadelphus caucasicus</i>	48	35/II	М	–	+,+
<i>B. Raddeana</i>	38	20/II	МК	–	+,+	<i>P.coronarius</i>	42	15/II	–	–	+,+
<i>Quercus robur</i>	44	15/I	МК	+	+,+	<i>Spiraea cana</i>	42	20/II	–	–	+,+
<i>Ulmus glabra</i>	45	75/II	М	–	+,–	<i>Berberis vulgaris f. atropurpurea</i>	40	25/II	К	+	+,+
<i>U. laevis</i>	44	65/II	МК	+	+,+	<i>Cotoneaster integerrima</i>	46	25/I	КМ	–	+,+
<i>Pyrus rossica</i>	42	55/I	–	–	+,+	<i>C. tomentosa</i>	46	30/III	ПС	–	+,+
<i>Malus baccata</i>	43	30/I	–	+	+,+	<i>Rosa glauca</i>	11	15/II	–	–	–,–
<i>Sorbus aucuparia</i>	47	80/I	М	+	+,+	<i>Cerasus fruticosa</i>	30	20/II	М	+	+,+
<i>S. aucuparia f. laciniata</i>	35	15/I	–	–	+,+	<i>Euonymus europaea</i>	44	20/III	М	–	+,+
<i>S. intermedia</i>	37	80/III	–	–	–,–	<i>E. nana</i>	42	5/II	КМ	–	+,–
<i>Amelanchier ovalis</i>	44	20/I	–	–	+,+	<i>Syringa Josicaea</i>	48	45/I	М	+	+,+
<i>Crataegus monogyna</i>	35	25/I	М	–	+,+	<i>S. vulgaris</i>	48	35/II	–	+	+,+
<i>C. nigra</i>	41	35/I	М	–	+,+	<i>Sambucus Tigrani</i>	31	–/II	–	–	–,–
<i>C. pentagyna</i>	41	25/I	М	–	+,+	<i>Viburnum lantana</i>	44	20/II	КМ	+	+,+
<i>Tilia cordata</i>	45	15/I	М	–	+,+	<i>Lonicera baltica</i>	38	35/I	–	+	+,+

Продолжение табл. 1

Вид	А	ОП/З	ЭГ	С	Ц, П	Вид	А	П/З	ЭГ	С	Ц, П
Деревья						Кустарники					
<i>T. platyphyllos</i>	46	20/І	М	–	+,+	<i>L. xylosteum</i>	35	25/І	М	+	+,+
<i>T. tomentosa</i>	37	10/І	М	+	+,+	<i>L. nigra</i>	20	20/І	М	+	+,+
<i>Fraxinus excelsior</i>	46	20/ІІ	М	–	–,–	<i>L. caerulea</i>	44	20/І	М	–	+,+
<i>Acer tataricum</i>	49	20/ІІ	М	+	+,+	<i>L. subarctica</i>	42	5/І	КМ	–	+,–
						<i>Rosa canina</i>	48	45/ІІ	М	+	+,+
						<i>Ribes alpinum</i>	34	53/ІІ	М	–	+,+
Североамериканские виды											
<i>Picea pungens</i>	43	10/І	М	–	+,+	<i>Corylus cornuta</i>	46	65/І	–	–	+,–
<i>P. pungens f. argentea</i>	40	15/І	М	–	+,+	<i>Ribes aureum</i>	38	55/ІІ	МК	–	+,+
<i>Salix lucida</i>	22	5/І	М	–	+,+	<i>Physocarpus malvaceus</i>	34	5/ІІ	М	–	–,–
<i>Juglans cinerea</i>	29	80/ІІ	–	–	+,–	<i>P. populifolia</i>	45	4/ІІ	М	+	+,+
<i>Betula populifolia</i>	32	20/ІІ	МК	–	+,+	<i>Spiraea alba</i>	43	60/ІІ	М	–	+,+
<i>Ulmus fulva</i>	43	10/ІІ	–	–	+,+	<i>Amelanchier spicata</i>	47	30/І	МК	–	+,+
<i>Crataegus Douglasii</i>	39	20/І	М	–	+,+	<i>Rosa nutcana</i>	20	30/ІІ	М	–	+,+
<i>C. flabellate</i>	44	20/І	МК	–	+,+	<i>Euonymus atropurpureus</i>	47	20/ІІ	–	–	+,+
<i>C. Faxonii</i>	39	15/І	К	–	+,+	<i>Eleagnus argentea</i>	50	30/ІІ	К	–	+,+
<i>C. mollis</i>	43	15/І	М	–	+,+	<i>Shepherdia argentea</i>	37	30/І	МК	–	+,–
<i>C. punctata</i>	39	15/І	К	–	+,+	<i>Symphoricarpos albus</i>	24	40/ІІ	МК	–	+,+
<i>C. Robesoniana</i>	40	15/І	–	–	+,+	<i>Lonicera flava</i>	18	25/ІІІ	–	+	+,+
<i>Acer kalifornicum</i>	40	15/ІІ	М	–	+,–	<i>L. glaucescens</i>	35	30/ІІ	М	–	+,+
<i>A. negundo</i>	45	20/ІІІ	М	+	+,+						
<i>A. saccharum</i>	35	15/ІІ	М	–	+,+						
<i>Tilia americana</i>	44	15/І	М	+	+,+						
<i>Fraxinus americana</i>	39	5/ІІ	М	–	–,–						

Окончание табл. 1

Вид	А	ОП/З	ЭГ	С	Ц, П	Вид	А	П/З	ЭГ	С	Ц, П
Деревья						Кустарники					
<i>F. lanceolata</i>	45	10/II	М	-	-,-						
<i>F. oregona</i>	40	15/II	-	-	-,-						
<i>F. pennsylvanica</i>	43	20/I	М	-	+,-						
<i>Malus coronaries</i>	43	10/I	М	-	+,-						
<i>M. platiocarpa</i>	40	15/I	М	-	+,-						
<i>Alnus rugosa</i>	22	5/I	М	-	+,-						
<i>Prunus pensylvanica</i>	39	5/II	М	-	+,-						

Примечание: А – возраст, лет; ОП – отмершие побеги, %; З – зимостойкость, балл; ЭГ – экологическая группа; С, Ц, П – наличие самосева, цветения и плодоношения соответственно. М – мезофиты, МК – мезоксерофиты, К – ксерофиты, КМ – ксеромезофиты, Г – гигрофиты, КГ – ксерогигрофиты, МГ – мезогигрофиты, ПС – психрофиты, МПС – мезопсихрофиты, КПТ – ксеропетрофиты.

Таблица 2

Продолжительность жизни и биологическая характеристика лиан разного географического происхождения в сухой степи Республики Хакасия

Table 2

Life expectancy and biological characteristic of lianas of different geographical origin in the dry steppe of the Republic of Khakassia

Вид	А	ОП/З	ЭГ	С	Ц, П	Вид	А	ОП/З	ЭГ	С	Ц, П
Восточноазиатские виды						Среднеазиатские виды					
<i>Clematis paniculata</i>	51	-/VI	-	+	+,-	<i>Clematis orientalis</i>	36	-/II	МГ	+	+,-
<i>Ampelopsis aconitifolia</i>	37	-/II	-	-	-,-	<i>C. tangutica</i>	42	-/II	М	-	+,-
Дальневосточные виды						Сибирские виды					
<i>Aristolochia manshuriensis</i>	47	15/II	Г	-	+,-	<i>Atragene ochotensis</i>	10	15/II	М	-	+,-
<i>Clematis fusca</i>	47	-/VI	М	+	+,-	<i>A. sibirica</i>	47	20/I	МК	+	+,-
<i>C. serratifolia</i>	43	-/II	МК	+	+,-	<i>Clematis glauca</i>	45	15/II	К	+	+,-
<i>Schisandra chinensis</i>	38	-/II	М	-	-,-	<i>Menispermum dauricum</i>	58	-/VI	МК	-	+,-
<i>Celastrus orbiculata</i>	35	-/III	МК	-	-,-	Североамериканские виды					
<i>Vitis amurensis</i>	46	-/II	М	+	+,-	<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	45	10/II	М	-	+,-
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	46	-/III	М	-	-,-	<i>Menispermum canadense</i>	45	90/VI	М	-	-,-

Возраст кустарников достигает $41,2 \pm 2,6$ года, с минимумом 22 (*Tamarix laxa* Willd.) и максимумом 53 года (*Berberis sphaerocarpa* Kar. et Kir.). Самосев отмечен у *B. sphaerocarpa*. Цветут 100 % кустарников, плодоносят – 63,6 %, цветут, но не плодоносят – 36,3 %.

Лианы представлены 2 видами ломоносов – *Clematis orientalis* L. и *C. tangutica* (Maxim.) Korsh. *C. tangutica* закончил свой жизненный цикл в 32 года. Обе лианы цвели и формировали полноценные семена.

По зимостойкости 57,2 % среднеазиатских растений имеют II балл, I баллом характеризуются 33,3 % видов, III баллом – 9,5 %. В экологическом отношении изучаемые древесные растения принадлежат к 5 группам: мезофиты (50 %), мезоксерофиты (30 %), ксеромезофиты, ксерофиты и мезогигрофиты (по 5 %). Для нескольких видов экологические группы не установлены.

По многолетним наблюдениям для растений Средней Азии основными факторами, ограничивающими нормальный рост и развитие в условиях дендрария, являются низкая зимостойкость видов и раннее завершение жизненного цикла в связи с неблагоприятными условиями произрастания.

Европейские виды. Растений с европейским происхождением в коллекции насчитывается 40 видов (14,6 %), из них 19 – деревья, 21 – кустарники. Средний возраст деревьев составил 42 ± 1 год, кустарников – $40 \pm 2,5$ лет. Деревьев старше 40 лет – 70 %. Однако количество отмерших побегов у некоторых из них свидетельствует о глубокой старости. Для *Sorbus intermedia* (Ehrh.) Pers. характерно 80 % отмерших побегов, оставшиеся ежегодно обмерзают. *S. intermedia* в условиях дендрария изменила свою жизненную форму, произрастая в виде кустарничка. *Ulmus glabra* Huds. и *U. laevis* Pall. в возрасте 45 и 44 года имеют соответственно 75 и 65 % отмерших побегов. В то же время липы *Tilia platyphyllos* Scop., *T. cordata* Mill. и *T. tomentosa* Moench соответственно в возрасте 46, 45 и 37 лет характеризуются небольшим количеством отмерших побегов – 15, 10 и 20 % соответственно. Самосев отмечен у 30 % (табл. 1, 2).

Возраст кустарников европейской флоры варьирует от 11 до 48 лет. У 11 % видов он имеет максимальные значения. У таких кустарников, как *Syringa josikaea* Jacq., *S. vulgaris* L., *Philadelphus caucasicus* Koehne, доля отмерших побегов составляет 35–45 %. *Sambucus Tigrani* N. Troitzk. закончила свой жизненный цикл в возрасте 31 года. Самосев характерен только для 40 % кустарников этой флоры. Цветут 90,4 % видов, 80,9 % плодоносят. Редко цветет и плодоносит *Euonymus nana* Vieb.

Большая часть изучаемых растений европейского происхождения являются зимостойкими в условиях дендрария: 50 % видов имеют I балл, 42,5 % – II балл, 7,5 % – III балл.

К мезофитам отнесены 28 видов (40 %), по 8,5 % – к мезоксерофитам и ксеромезофитам, по одному виду – к психрофитам и ксерофитам. У 12 видов европейского происхождения не удалось установить экологическую группу. Основными причинами гибели растений этого происхождения становятся их низкая зимостойкость, сухость воздуха и несоответствие эдафических условий биологии видов.

Североамериканские виды. В дендрарии произрастает коллекция североамериканских растений, представленная 39 видами (14,2 %). Из них деревья – 24 вида, кустарники – 13 и лианы – 2 вида (табл. 1, 2). Возраст деревьев находится в

пределах 22–45 лет, составляя в среднем $39,2 \pm 1,3$ года. Наибольший процент отмерших побегов наблюдался у *Juglans cinerea* L., который ранее пострадал по случайной причине, получив глубокое повреждение ствола, и начал постепенно усыхать в возрасте 29 лет. У остальных растений доля отмерших побегов составляет от 5 до 20 %. Цвели 87,5 % видов, плодоносили – 75 %. Раннее ежегодное цветение есть у *Acer kalifornicum* (Torr. et Gray) Dietr., но семена при этом не формируются. Самосев отмечен лишь у 2 видов деревьев – *A. negundo* L. и *Tilia americana* L.

Кустарники Северной Америки характеризуются средним возрастом $37,4 \pm 3,2$ года – от 18 (*Lonicera glaucescens* Rydb.) до 50 лет (*Eleagnus argentea* Pursh.). В возрасте 34 лет погиб *Physocarpus malvaceus* (Grege) Kize. Очень старым растением (43 года) является *Spiraea douglasi* Hook., которая 3 года не цветет и имеет до 60 % отмерших побегов на одно растение. Цветут 83,3 % североамериканских кустарников, из них 66,6 % успешно плодоносят. Цветут, но не плодоносят *Corylus cornuta* Marsh. и *Shepherdia argentea* Pursh. Редкий самосев наблюдается у *Physocarpus opulifolia* (L.) Maxim., а обильный – у *Lonicera flava* Sims.

У североамериканских лиан – *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch. и *Menispermum canadiense* L. – ежегодно обмерзают концы побегов. Весной они восстанавливаются, активно растут, но к зиме не успевают одревеснеть. Годовой прирост у *P. quinquefolia* может достигать 2,5 м, он цветет, плодоносит и формирует полноценные семена. *M. canadiense* не цветет, произрастая в очень тенистом месте дендрария, под плотным пологом деревьев, но активно разрастается вегетативно.

Большинство изучаемых растений данного региона имеют II балл зимостойкости (48,7 %), 43,6 % видов характеризуются полной зимостойкостью (I балл), 5,2 % – III баллом, 2,5 % – VI баллом (*M. canadiense* L.).

Североамериканские растения принадлежат к 3 экологическим группам: мезофиты (66,7 %), мезоксерофиты (22,2 %) и ксерофиты (11,1 %).

Основными лимитирующими факторами для благополучного произрастания характеризуемых растений в сухой степи являются их низкая зимостойкость, несоответствие эдафических условий биологии видов и сухость воздуха в период цветения.

Заключение

Исследования продолжительности жизни и зимостойкости древесных растений-интродуцентов в сухостепной зоне Хакасии показали, что среди аборигенных растений долгожителями являются древесные виды *Larix sibirica* и *Pinus sylvestris* и кустарник *Caragana frutex*. Большинство древесных растений флоры Сибири (80 %) в степной зоне Хакасии абсолютно зимостойки (I балл).

Долгожители дальневосточной флоры – деревья *Pyrus ussuriensis* и *Crataegus maximowiczii* и кустарник *Corylus heterophylla*. Высокой зимостойкостью (I, II балл) характеризуется 94,6 % дальневосточных растений. Среди восточноазиатских деревьев продолжительный жизненный цикл у *Salix babylonica*, *Larix leptolepis*, *Morus alba* L., среди кустарников – у *Berberis tibetica*. 59 % древесных растений данного региона имеют II балл зимостойкости, 25 % – I балл.

Наибольшей продолжительностью жизни у среднеазиатских растений характеризуются *Acer Semenovii* и кустарник *Berberis sphaerocarpa*. По зимостойкости выделено 3 группы: I балл – 33,3 % видов, II – 42,5 % и III – 7,5 %. У растений европейского происхождения наиболее возрастным является *Acer tataricum* и кустарники *Philadelphus caucasicus*, *Syringa Josikaea* и *S. vulgaris*. Наиболее зимостойкие – 50 % видов (I балл), 42,5 % имеют II балл. Среди североамериканских представителей флоры наибольшим возрастом характеризуются *Fraxinus lanceolata*, *Acer negundo* и кустарник *Eleagnus argentea*. Большинство растений здесь имеют I и II баллы зимостойкости (92,3 %).

Выявлены основные факторы, снижающие продолжительность жизни древесных растений в условиях сухой степи. Для аборигенных растений это – низкая зимостойкость и несоответствие эдафических условий биологии видов, для инорайонных – кроме перечисленных, низкая атмосферная влажность воздуха в период цветения и раннее завершение жизненного цикла.

В условиях сухой степи устойчивее оказались растения сибирской флоры, отнесенные к мезоксерофитной экологической группе, а из инорайонных флор – представители мезофитной группы дальневосточной флоры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агроклиматический справочник по Красноярскому краю и Тувинской автономной области. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 288 с.
Agroclimatic Guide for Krasnoyarsk Krai and the Tuvan Autonomous Region. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1961. 288 p. (In Russ.).
2. Атрохин В.Г., Курамшин В.Я. Ландшафтное лесоводство. М.: Экология, 1991. 176 с.
Atrokhin V.G., Kuramshin V.Ya. *Landscape Forestry*. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 176 p. (In Russ.).
3. Бюннинг Э. Ритмы физиологических процессов («Физиологические часы»). М.: Иностран. лит., 1961. 184 с.
Bünning E. *The Physiological Clock*. Transl. from German. Moscow, Inostrannaya literature Publ., 1961. 184 p. (In Russ.).
4. Вигоров Л.И. Практикум по физиологии древесных растений. М.: Высш. шк., 1961. 148 с.
Vigorov L.I. *Workshop on the Physiology of Woody Plants*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1961. 148 p. (In Russ.).
5. Деревья и кустарники СССР: дикорастущие, культивируемые и перспективные для интродукции. М.: АН СССР, 1949–1965. 4100 с.
Trees and Shrubs of the USSR: Wild, Cultivated and Promising for Introduction. Moscow, AN SSSR Publ., 1949–1965. 4100 p. (In Russ.).
6. Елагин И.Н., Лобанов А.И. Атлас-определитель фенологических фаз растений. М.: Наука, 1979. 95 с.
Elagin I.N., Lobanov A.I. *Atlas for Identification of Phenological Phases of Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 95 p. (In Russ.).
7. Красная книга Республики Хакасия. Редкие и исчезающие виды растений и грибов. Новосибирск: Наука, 2012. 287 с.
The Red Data Book of the Republic of Khakassia. Rare and Endangered Species of Plants and Fungi. Novosibirsk, Nauka Publ., 2012. 287 p. (In Russ.).
8. Лантин П.И., Калуцкий К.К., Калуцкая О.Н. Интродукция лесных пород. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 224 с.

- Lapin P.I., Kalutskiy K.K., Kalutskaya O.N. *Introduction of Forest Species*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 224 p. (In Russ.).
9. Лархер В. Экология растений. М.: Мир, 1978. 384 с.
- Larcher W. *Physiological Plant Ecology*. Moscow, Mir Publ., 1978. 384 p. (In Russ.).
10. Линдемман Г.В. Что такое «ослабленные деревья и древостои» // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2003. № 2. С. 34–40.
- Lindeman G.V. Essence of the Notion “Trees and Forest Stands Weakening”. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2003, no. 2, pp. 34–40. (In Russ.).
11. Лиховид Н.И. Интродукция древесных растений в аридных условиях юга Средней Сибири. Абакан: Фирма «Март», 2007. 288 с.
- Likhovid N.I. *Introduction of Woody Plants in Arid Conditions of the South of Central Siberia*. Abakan, Firma “Mart” Publ., 2007. 288 p. (In Russ.).
12. Лобанов А.И., Гордеева Г.Н. Методы изучения естественного возобновления древесных растений в интродукционных популяциях // Сохранение биологического разнообразия растений в аридной зоне: материалы науч. конф., посвящ. 90-летию со дня рождения Н.И. Лиховид. Абакан: Кооператив «Журналист», 2016. С. 18–29.
- Lobanov A.I., Gordeeva G.N. Methods of Studying the Natural Renewal of Woody Plants in Introduced Populations. *Conservation of Plant Biological Diversity in the Arid Zone: Proceedings of the Scientific Conference Dedicated to the 90th Anniversary of the N.I. Likhovid*. Abakan, Kooperativ “Zhurnalist” Publ., 2016, pp. 18–29. (In Russ.).
13. Лучник З.И. Методика изучения интродуцированных деревьев и кустарников // Вопросы декоративного садоводства. Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1964. С. 6–22.
- Luchnik Z.I. Methodology for Studying Introduced Trees and Shrubs. *Issues of Ornamental Horticulture*. Barnaul, Altayskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1964, pp. 6–22. (In Russ.).
14. Лысова Н.В. Цветение и плодоношение интродуцированных древесных растений в условиях сухой степи // Бюл. ГБС. 1976. Вып. 101. С. 3–10.
- Lysova N.V. Blooming and Fruiting of Introduced Woody Plants in the Dry-Steppe Conditions. *Bulletin of the Central Botanical Garden*, 1976, iss. 101, pp. 3–10. (In Russ.).
15. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья-95, 1995. 989 с.
- Cherepanov S.K. *Vascular Plants of Russia and Neighboring States*. Saint Petersburg, Mir i sem'ya-95 Publ., 1995. 989 p. (In Russ.).
16. Юсуфов А.Г., Нуантхасинг Л. Эндогенная регуляция продолжительности жизни растений и ее эволюционные аспекты // Журн. общей биологии. 1989. Т. 49, № 6. С. 764–777.
- Yusufov A.G., Nuanthasing L. Endogenous Regulation of Plant Life Expectancy and Its Evolutionary Aspects. *Journal of General Biology*, 1989, vol. 49, no. 6, pp. 764–777. (In Russ.).
17. Cowett F., Bassuk N. Street Tree Diversity in Three Northeastern U.S. States. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2017, vol. 43, iss. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.48044/jauf.2017.001>
18. Dostál R. *On Integration of Plants*. Cambridge, Harvard University Press, 1967. 218 p.
19. *Genetics and Genomics of Rosaceae*. Ed. by K.M. Folta, S.E. Gardiner. New York, Springer, 2009. 636 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77491-6>
20. Ghafari S., Kaviani B., Sedaghatthoor Sh., Allahyari M.S. Ecological Potentials of Trees, Shrubs and Hedge Species for Urban Green Spaces by Multi Criteria Decision Making. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, vol. 55, art. 126824. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126824>

21. Goldberg R.B. Plants: Novel Developmental Processes. *Science*, 1988, vol. 240, iss. 4858, pp. 1460–1467. <https://doi.org/10.1126/science.3287622>
22. Klopstech K. *Acetabularia*. Circadian Rhythms. *The Molecular Biology of Plant Development*. Ed. by D. Smith, H. Grierson. Oxford, Blackwell. Scientific, 1982, pp. 155–158.
23. Linderholm H.W. Climatic Influence on Scots Pine Growth on Dry and Wet Soils in the Central Scandinavian Mountains, Interpreted from Tree-Ring Width. *Silva Fennica*, 2001, vol. 35, no. 4, pp. 415–424. <https://doi.org/10.14214/sf.574>
24. Sjöman H., Hirons A.D., Bassuk N.L. Urban Forest Resilience through Tree Selection – Variation in Drought Tolerance in *Acer*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, vol. 14, iss. 4, pp. 858–865. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.004>
25. Strimbeck G.R., Schaberg P.G., Fossdal C.G., Schröder W.P., Kjellsen T.D. Extreme Low Temperature Tolerance in Woody Plants. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, art. 884. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00884>
26. Wilkins M.B. Circadian Rhythms in Plants. *Physiology of Plant Growth and Development*. London, McGraw-Hill, 1969, pp. 647–671.
27. Willis K.J., McElwain J.C. *The Evolution of Plants*. USA, Oxford University Press, 2002. 378 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья
УДК 634.73:630*22
DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-91-102

Повышение эффективности многоцелевого лесопользования на выработанных торфяниках

С.С. Макаров¹ , канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>


И.Б. Кузнецова², канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-4568-2021](https://orcid.org/0000-0001-5011-3271),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5011-3271>

А.В. Заушинцева³, д-р биол. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4645-828X>

Е.И. Куликова⁴, канд. с.-х. наук, зав. каф.; ResearcherID: [AAL-8290-2021](https://orcid.org/0000-0002-5981-2690),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5981-2690>

Г.В. Тяк¹, канд. биол. наук, рук. группы недревесной продукции леса;
ResearcherID: [AAB-4215-2021](https://orcid.org/0000-0002-1081-4054), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1081-4054>

Т.В. Курлович⁵, канд. биол. наук, вед. науч. сотр.

¹Центрально-европейская лесная опытная станция, просп. Мира, д. 134, г. Кострома, Россия, 156013; makarov_serg44@mail.ru , ce-los-np@mail.ru

²Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Учебный городок, Караваяевская с/а, д. 34, п. Караваяево, Костромской р-н, Костромская обл., Россия, 156530; sonneraiser@yandex.ru

³Кемеровский государственный университет, ул. Красная, д. 6, г. Кемерово, Россия, 650000; alexaz58@yandex.ru

⁴Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Вологодская обл., Россия, 160555, elena-kulikova@list.ru

⁵Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, ул. Сурганова, д. 2 в, Минск, Республика Беларусь, 220012; vaccinium@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.20 / Одобрена после рецензирования 20.08.20 / Принята к печати 30.08.20

Аннотация. Более полное вовлечение и эффективное использование недревесных ресурсов леса является одной из актуальных проблем развития лесного комплекса Российской Федерации в рамках обеспечения многоцелевого, рационального и неистощительного лесопользования. Создание плантаций лесных ягодных растений позволит решить проблему биологической рекультивации выработанных торфяных месторождений, а также повысить продуктивность дикорастущих ягодников и увеличить биоразнообразие неиспользуемых земель лесного фонда. Цель работы – изучить перспективы использования клонального микроразмножения как наиболее эффективного способа получения высококачественного сортового посадочного материала лесных ягодных растений для закладки плантаций на рекультивируемых выработанных торфяниках. Приведены результаты исследований клонального микроразмножения лесных ягодных растений – полувысокослой голубики и клюквы болотной перспективных сортов и гибридных форм – и их адаптации к условиям выработанных торфяных месторождений. Представлены данные по формированию микропобегов и корней растений голубики и клюквы на питательной среде WPM при использовании росторегулирующих веществ. На этапе собственно микроразмножения максимальная суммарная длина микропобегов отмечена у полувысокослой голубики (23,7 см) при концентрации цитокинина 2-іР 3,0 мг/л, у клюквы болотной (22,7 см) –

при концентрации 0,5 мг/л. На этапе укоренения *in vitro* максимальная суммарная длина корней растений полувысокорослой голубики (12,1 см) и клюквы болотной (51,7 см) выявлена при концентрации ауксина ИУК 1,0 мг/л. Охарактеризована приживаемость растений в нестерильных условиях *in vivo* в зависимости от состава субстрата и в естественных условиях на выработанных торфяниках. На этапе адаптации к нестерильным условиям *in vivo* наибольшая приживаемость растений голубики наблюдалась на субстрате из торфа переходного типа и сфагнома (95–98 %), клюквы – на субстрате из торфа верхового типа и сфагнома (100 %). В условиях выработанных торфяников приживаемость растений полувысокорослой голубики и клюквы болотной достигала 100 %. Метод клонального микроразмножения является наиболее эффективным способом получения высококачественного оздоровленного посадочного материала лесных ягодных растений для быстрого размножения перспективных сортов и гибридных форм, создания плантаций с целью рекультивации выработанных торфяников в рамках организации многоцелевого лесопользования.

Ключевые слова: клюкwa болотная, полувысокорослая голубика, выработанные торфяники, рекультивация торфяников, клональное микроразмножение, *in vitro*, *in vivo*

Для цитирования: Макаров С.С., Кузнецова И.Б., Заушинцева А.В., Куликова Е.И., Тяк Г.В., Курлович Т.В. Повышение эффективности многоцелевого лесопользования на выработанных торфяниках // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 91–102. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-91-102>

Original article

Improving the Efficiency of Multipurpose Forest Management of Depleted Peatlands

Sergey S. Makarov¹, Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAK-9829-2021](https://orcid.org/0000-0003-0564-8888), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0564-8888>

Irina B. Kuznetsova², Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAB-4568-2021](https://orcid.org/0000-0001-5011-3271),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5011-3271>

Alexandra V. Zaushintsena³, Doctor of Biology, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4645-828X>

Elena I. Kulikova⁴, Candidate of Agriculture, Head of Department;

ResearcherID: [AAL-8290-2021](https://orcid.org/0000-0002-5981-2690), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5981-2690>

Galina V. Tyak¹, Candidate of Biology, Head of Non-Timber Forest Products Group;

ResearcherID: [AAB-4215-2021](https://orcid.org/0000-0002-1081-4054), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1081-4054>

Tatyana V. Kurlovich⁵, Candidate of Biology, Leading Research Scientist

¹Central European Forest Experimental Station, prosp. Mira, 134, Kostroma, 156013, Russian Federation; makarov_serg44@mail.ru, ce-los-np@mail.ru

²Kostroma State Agricultural Academy, Uchebnyy gorodok, Karavayevskaya s/a, 34, Karavaevo, Kostroma District, Kostroma Region, 156530, Russian Federation; sonnereiser@yandex.ru

³Kemerovo State University, ul. Krasnaya, 6, Kemerovo, 650000, Russian Federation; alexaz58@yandex.ru

⁴Vologda State Dairy Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Shmidta, 2, s. Molochnoe, Vologda, Vologda Region, 160555, Russian Federation; elena-kulikova@list.ru

⁵Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, ul. Surganova, 2v, Minsk, 220012, Republic of Belarus; vaccinium@mail.ru



Received on May 15, 2020 / Approved after reviewing on August 20, 2020 / Accepted on August 30, 2020

Abstract. A more complete involvement and effective use of non-timber forest resources is one of the most pressing problems in the development of the forest complex of the Russian Federation within the framework of ensuring multi-purpose, rational and sustainable forest management. The creation of forest berry plantations will resolve the issue of biological reclamation of depleted peatlands, as well as increase the productivity of wild berries and the biological diversity of unused forest lands. The work is aimed at studying the prospects of using clonal micropropagation as the most effective way of producing high-quality cultivar planting material of forest berry plants for laying out plantations on reclaimed depleted peatlands. The paper presents the results of research on clonal micropropagation of forest berry plants – half highbush blueberry and swamp cranberry of promising cultivars and hybrid forms, as well as their adaptation to the conditions of depleted peat deposits. The data on the formation of microshoots and roots of blueberry and cranberry plants on Woody Plant Medium (WPM) using growth-regulating substances are presented. The maximum total length of microshoots was observed in half highbush blueberry (23.7 cm) at the cytokinin 2-iP concentration of 3.0 mg/L, and in swamp cranberry (22.7 cm) at the 2-iP concentration of 0.5 mg/L at the stage of proper micropropagation. The maximum total length of roots of half highbush blueberry (12.1 cm) and swamp cranberry (51.7 cm) was observed at the IAA auxin concentration of 1.0 mg/L at the stage of rooting *in vitro*. The data on plant survival rate in non-sterile conditions *in vivo* depending on the composition of the substrate and in natural conditions on depleted peatlands are presented. The highest survival rate of blueberry plants was observed on the substrate of transitional peat and sphagnum (95–98 %), cranberry – on the substrate of high-moor peat and sphagnum (100 %) at the stage of adaptation to non-sterile conditions *in vivo*. The survival rate of plants of half highbush blueberry and swamp cranberry reached 100 % in the conditions of depleted peatlands. Clonal micropropagation is the most effective way to obtain high-quality healthy planting material of forest berry plants for the rapid propagation of promising cultivars and hybrid forms and its further use in the creation of plantations in order to reclaim depleted peatlands within the framework of the organization of multipurpose forest management.

Keywords: swamp cranberry, half highbush blueberry, depleted peatlands, reclamation of peatlands, clonal micropropagation, *in vitro*, *in vivo*

For citation: Makarov S.S., Kuznetsova I.B., Zaushintsena A.V., Kulikova E.I., Tyak G.V., Kurlovich T.V. Improving the Efficiency of Multipurpose Forest Management of Depleted Peatlands. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 91–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-91-102>

Введение

Сохранение лесных ресурсов и их комплексное использование в рамках организации многоцелевого, рационального и неистощительного лесопользования является важнейшим принципом лесного законодательства [5], приоритетным направлением развития лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса [9], а также соответствует планам федеральных проектов «Сохранение лесов» и «Сохранение биоразнообразия и развитие экотуризма» (в рамках Национального проекта «Экология») [7]. Решение актуальных задач развития лесного хозяйства Российской Федерации предусматривает более полное вовлечение и эффективное использование всех лесных ресурсов, включая недревесные.

Кроме того, в настоящее время достаточно серьезной проблемой лесопользования, особенно в Центральном федеральном округе Российской Федерации, является рекультивация неиспользуемых земель, нарушенных в результате промышленных работ, в том числе добычи торфа [10]. На территории России более 140 млн га занято болотами, значительная часть из которых (>70 %) находится на землях лесного фонда. Многолетняя разработка торфа, осуществлявшаяся при реализации крупных проектов по осушению торфяных болот, обусловила образование выработанных торфяных месторождений (их общая площадь к концу XX в. достигала 1 млн га), преимущественно представляющих собой «бросовые земли». В связи с этим проблема рекультивации выработанных торфяников актуальна, в особенности для центрально-европейской части России, где сосредоточено более 70 % выработанных торфяников [2, 8].

Выработанные торфяники отличаются низким плодородием, высокой кислотностью и рядом других особенностей, в связи с чем возможности использования их в сельском и лесном хозяйстве весьма ограничены. При этом разработка торфа приводит, помимо разрушения экологической системы болота, к сокращению численности популяций его обитателей, вплоть до полного уничтожения, к уменьшению запасов грунтовых, подземных и поверхностных вод. Последнее значительно повышает риск возникновения торфяных пожаров, следствием которых становится загрязнение атмосферы продуктами сгорания торфа. Уменьшения негативных последствий торфоразработок можно достичь путем биологической рекультивации выработанных торфяников, а именно созданием на их территории плантаций лесных ягодных растений (брусники, клюквы, голубики, княженики и др.), традиционно произраставших в лесных биоценозах. Это приобретает большую актуальность и в связи с неуклонным снижением ресурсов дикорастущих ягодников, уменьшением их продуктивности и ухудшением качества [10, 21, 27].

На сегодняшний день промышленные плантации клюквы и голубики есть лишь в ряде стран (США, Канада, Белоруссия, ЮАР и др.), а брусники – только в Германии. Массовое получение сортового и оздоровленного посадочного материала, по-видимому, не рассматривается как основной способ увеличения площадей плантаций. В связи с этим работа по созданию промышленных плантаций лесных ягодных растений в России имеет большое практическое значение.

При закладке высокопродуктивных плантаций лесных ягодных растений в промышленных масштабах необходимо использовать оздоровленный сортовой посадочный материал, применять специальную агротехнику возделывания. На сегодняшний день на Центрально-европейской лесной опытной станции Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства разработаны технологии плантационного выращивания лесных ягодных растений (клюквы болотной, клюквы крупноплодной, брусники обыкновенной, голубики узколистной, княженики арктической, красники и др.).

Актуальной остается задача быстрого размножения сортовых растений лесных ягодных культур с целью получения посадочного материала для рекультивации выработанных торфяников. Для решения данной задачи

рационально применять метод клонального микроразмножения, позволяющий независимо от сезона и в короткий срок формировать из небольшого количества исходного материала огромное количество оздоровленных сортовых растений для закладки плантаций. Это особенно важно при размножении нового сорта, когда из одного удачно введенного в культуру *in vitro* экспланта можно получить 1–3 тыс. дочерних растений [11].

Цель работы – изучить перспективы использования клонального микроразмножения как наиболее эффективного способа получения высококачественного сортового посадочного материала лесных ягодных растений для закладки плантаций на рекультивируемых выработанных торфяниках.

Объекты и методы исследования

Наши исследования проводились в Лаборатории клонального микроразмножения растений на базе Центрально-европейской лесной опытной станции Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства в 2018–2020 гг. по общепринятым методикам [3]. Объектами исследований были растения-регенеранты лесных ягодных культур с высокими продуктивностью, зимостойкостью и устойчивостью к ряду вредителей и заболеваний: полувысокорослой голубики (*Vaccinium corymbosum* L. × *V. angustifolium* Ait.) сорта Northblue и гибридной формы 23-1-11, а также клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* Pers.) сорта Дар Костромы и гибридной формы 1-15-635. Изучали влияние различных росторегулирующих веществ на биометрические показатели клонируемых растений. Выбор регуляторов роста и их концентраций осуществляли, опираясь на исследования российских и зарубежных ученых [1, 4, 6, 12–20, 22–26].

Растения-регенеранты клюквы и голубики культивировали на питательной среде WPM (Woody Plant Medium) в условиях световой комнаты при температуре 23...25 °С, влажности 75...80 % и фотопериоде 16/8 ч. На этапе собственно микроразмножения использовали цитокинин 2-иР в концентрациях 2,0; 3,0 и 4,0 мг/л для растений полувысокорослой голубики и в концентрациях 0,5; 1,0 и 1,5 мг/л – для растений клюквы болотной. В случае необходимости повышения количества микропобегов применение цитокининов является обязательным, поскольку оно снимает апикальное доминирование и пробуждает пазушные (адвентивные) почки, следовательно, увеличивает число микропобегов – от 5 до 30 [3]. На этапе укоренения *in vitro* для обоих видов ягодных растений использовали ауксин ИУК в концентрациях 0,5; 1,0 и 2,0 мг/л. Учитывали количество и длину образовавшихся микропобегов и корней (рис. 1).

По завершении формирования корневой системы в культуре *in vitro* для адаптации к нестерильным условиям *in vivo* растения пересаживали в кассеты с различными субстратами – торфом верхового и переходного типов с добавлением сфагнома, речного песка и универсального для рассады грунта (рис. 2). После адаптации к нестерильным условиям саженцы переносили на опытные участки выработанных торфяных месторождений на землях лесного фонда в Костромском районе Костромской области (южно-таежный лесной район европейской части России). Тип почвы на участках – древесно-сфагновый торф переходного типа. Определяли приживаемость растений в зависимости от субстрата в лабораторных и полевых условиях.

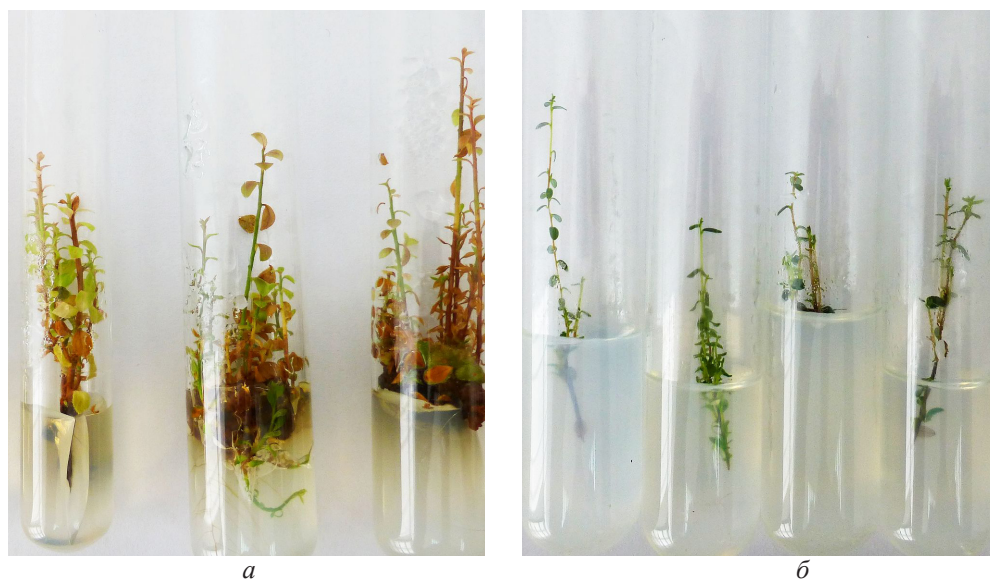


Рис. 1. Растения-регенеранты в культуре *in vitro* на питательной среде WPM:
a – полувысокорослая голубика; *б* – клюква болотная

Fig. 1. Regenerated plants *in vitro* on WPM: *a* – half highbush blueberry; *б* – swamp cranberry

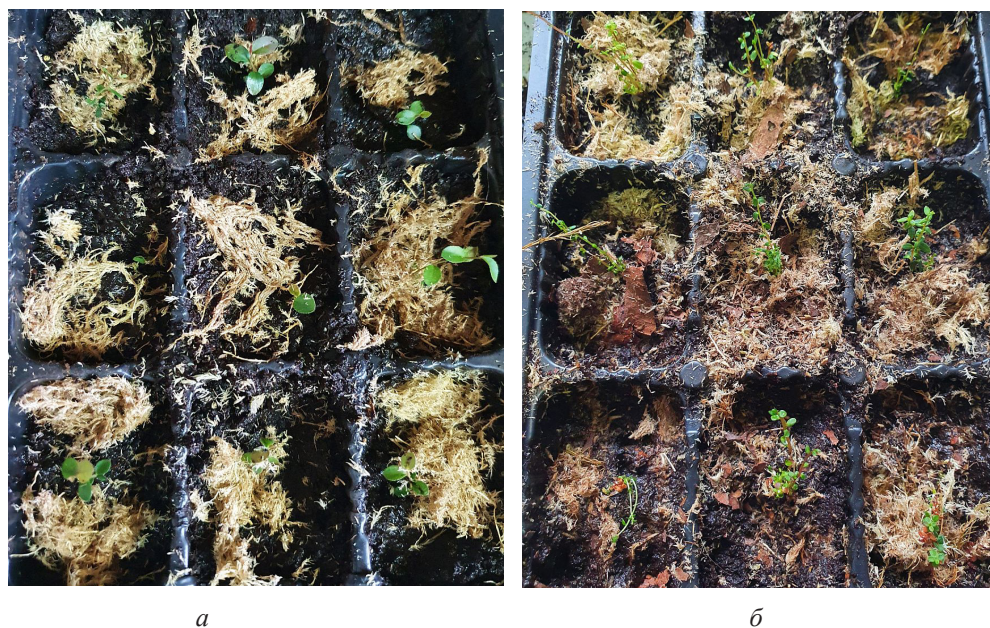


Рис. 2. Лесные ягодные растения в кассетах с торфяным субстратом: *a* – полувысокорослая голубика; *б* – клюква болотная

Fig. 2. Forest berry plants in cassettes with peat substrate: *a* – half highbush blueberry; *б* – swamp cranberry

Статистическую обработку данных выполняли при помощи пакета программ Microsoft Office 2016 и программы AGROS v.2.11. Применяли дисперсионный двухфакторный анализ, где фактор А – сорт или форма, фактор В –

концентрация регулятора роста в питательной среде. Оценку достоверности различий между средними данными вариантов опыта проводили посредством наименьшей существенной разности для 5 %-го уровня значимости ($НСР_{05}$).

Результаты исследования и их обсуждение

На этапе собственно микроразмножения суммарная длина побегов полувысокорослой голубики при концентрации цитокинина 2-іР 3,0 мг/л была наибольшей и составляла в среднем 23,7 см, при концентрации 4,0 мг/л – 22,0 см, а при 2,0 мг/л – 14,0 см (табл. 1). Чем большую суммарную длину имеют формирующиеся побеги, тем больше можно получить микрочеренков для регенерации новых растений. У экземпляров голубики гибридной формы 23-1-11 суммарная длина побегов была больше по сравнению с сортом Northblue – 21,5 и 18,3 см соответственно.

У растений-регенерантов клюквы болотной наибольшая суммарная длина побегов наблюдалась при концентрации цитокинина 2-іР 0,5 мг/л и достигала в среднем 22,7 см (табл. 1). При дальнейшем увеличении концентрации 2-іР до 1,0 и 1,5 мг/л суммарная длина побегов снижалась, составив 14,5 и 10,5 см соответственно. Значительных различий в зависимости от сорта не выявлено.

Таблица 1

Суммарная длина побегов полувысокорослой голубики / клюквы болотной на одно растение в зависимости от сорта и концентрации цитокинина 2-іР

Table 1

The total length of shoots of half highbush blueberry / swamp cranberry per plant depending on the cultivar and the concentration of the 2-іР cytokinin

Сорт	Суммарная длина побегов, см			<i>Среднее</i>
<i>Полувысокорослая голубика</i> (НСР ₀₅ : фактор А = 0,52, фактор В = 0,48, общ. = 0,83)				
Northblue	13,8	24,4	16,8	18,3
Гибридная форма 23-1-11	14,2	23,0	27,2	21,5
<i>Среднее</i>	14,0	23,7	22,0	–
<i>Клюква болотная</i> (НСР ₀₅ : фактор А = 0,60, фактор В = 0,48, общ. = 0,58)				
Дар Костромы	22,0	15,3	10,2	15,8
Гибридная форма 1-15-635	23,5	13,8	10,9	16,1
<i>Среднее</i>	22,7	14,5	10,5	–

По результатам анализа влияния количества пассажей на коэффициент размножения установлено, что у растений полувысокорослой голубики сорта Northblue максимальный коэффициент размножения приходится в среднем на 5–7-й пассажи, у гибридной формы 23-1-11 – на 6–8-й. У клюквы болотной наибольший коэффициент размножения отмечен: у растений сорта Дар Костромы – на 7-м пассаже, у гибридной формы 1-15-635 – на 9-м.

На этапе укоренения *in vitro* максимальная суммарная длина корней полувысокорослой голубики на одно растение отмечена при концентрации ауксина ИУК 1,0 мг/л (12,1 см). При концентрации ИУК 0,5 мг/л данный

показатель составил 5,2 см, при концентрации 2,0 мг/л – 7,1 см (табл. 2). Существенных различий в зависимости от сорта не наблюдалось.

Наибольшую суммарную длину корней (51,7 см) растения клюквы болотной имели при концентрации ауксина ИУК 1,0 мг/л (табл. 2). При концентрации 0,5 мг/л суммарный прирост составил 35,8 см, при концентрации 2,0 мг/л – 41,8 см.

Таблица 2

Суммарная длина корней полувысокорослой голубики / клюквы болотной на одно растение в зависимости от сорта и концентрации ауксина ИУК

Table 2

The total length of roots of half highbush blueberry / swamp cranberry per plant depending on the cultivar and the concentration of the IAA auxin

Сорт	Суммарная длина побегов, см, при концентрации ИУК, мг/л			Среднее
	0,5	1,0	2,0	
<i>Полувысокорослая голубика</i> (НСР ₀₅ : фактор А = 0,74, фактор В = 0,68, общ. = 0,94)				
Northblue	5,1	12,0	6,8	7,9
Гибридная форма 23-1-11	5,4	12,3	7,4	8,4
<i>Среднее</i>	5,2	12,1	7,1	–
<i>Клюква болотная</i> (НСР ₀₅ : фактор А = 0,98, фактор В = 0,86, общ. = 0,92)				
Дар Костромы	34,6	52,0	43,4	43,3
Гибридная форма 1-15-635	37,0	51,5	40,3	42,9
<i>Среднее</i>	35,8	51,7	41,8	–

На этапе адаптации к нестерильным условиям *in vivo* наибольшая приживаемость адаптируемых растений полувысокорослой голубики отмечена на субстрате из торфа переходного типа и сфагнума (95–98 %). Приживаемость на торфе переходного типа и верховом торфе варьировала от 85 до 95 %, на торфе с песком она составляла 70–90 %. Самая низкая приживаемость (30–40 %) отмечена на субстрате из смеси торфа с грунтом в соотношении 1:1 (табл. 3).

Приживаемость адаптируемых к нестерильным условиям растений клюквы болотной была максимальной (100 %) на субстрате из верхового торфа и сфагнума (табл. 4). На субстратах из верхового торфа и верхового торфа с песком (3:1) приживаемость составляла 95–96 %, на субстратах из переходного торфа с песком – всего 74–75 %.

Таблица 3

Приживаемость адаптируемых к нестерильным условиям растений полувысокорослой голубики по годам в зависимости от субстрата, %

Table 3

Survival rate of half highbush blueberry plants adaptable to non-sterile conditions by years depending on the substrate, %

Субстрат	2019 г.		2020 г.	
	Northblue	Гибридная форма 23-1-11	Northblue	Гибридная форма 23-1-11
Торф верхового типа	85	87	90	94
Торф верхового типа + песок (3:1)	70	85	75	90
Торф верхового типа + грунт (1:1)	35	30	40	30
Торф переходного типа	90	95	85	93
Торф переходного типа + сфагнум	95	98	98	95

Таблица 4

Приживаемость адаптируемых к нестерильным условиям растений клюквы болотной в зависимости от субстрата, %

Table 4

Survival rate of swamp cranberry plants adaptable to non-sterile conditions by years depending on the substrate, %

Субстрат	Дар Костромы	Гибридная форма 1-15-635
Торф верховой	96	95
Торф верхового типа + сфагнум	100	100
Торф верхового типа + песок (3:1)	95	96
Торф переходного типа	83	85
Торф переходного типа + сфагнум	85	88
Торф переходного типа + песок (3:1)	75	74

Адаптированные к нестерильным условиям *in vivo* растения полувысокорослой голубики и клюквы болотной высаживали на участки выработанных торфяников. У обеих исследуемых ягодных культур приживаемость составила 100 %.

Выводы

1. При клональном микроразмножении лесных ягодных растений на этапе собственно микроразмножения с использованием цитокинина 2-іР наибольшая суммарная длина побегов формировалась у полувысокорослой голубики сорта Northblue и гибридной формы 23-1-11 при концентрации цитокинина 3,0 мг/л, а у клюквы болотной сорта Дар Костромы и гибридной формы 1-15-635 – при концентрации 0,5 мг/л.

2. Наибольшая суммарная длина корней растений полувысокорослой голубики и клюквы болотной на этапе укоренения *in vitro* наблюдалась при использовании ауксина ИУК в концентрации 1,0 мг/л.

3. При адаптации к нестерильным условиям *in vivo* наибольшая приживаемость растений полувысокорослой голубики отмечена на субстрате из торфа переходного типа и сфагнома (95–98 %), у клюквы болотной – на субстрате из верхового торфа и сфагнома (100 %).

4. Приживаемость растений полувысокорослой голубики и клюквы болотной, высаженных на участках выработанных торфяников, достигала 100 %.

5. Метод клонального микроразмножения перспективен для получения посадочного материала полувысокорослой голубики и клюквы болотной, особенно для быстрого размножения новых сортов и гибридных форм, а также для создания плантаций лесных ягодных растений в целях рекультивации выработанных торфяников, что является одним из путей повышения эффективности многоцелевого, рационального и неистощительного лесопользования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Брилкина А.А., Лобов В.П., Давыдов И.В., Малышева О.В. Получение культуры *in vitro* растений клюквы крупноплодной и болотной // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. Сер.: Биология. 2006. № 1. С. 88–90.

Brilkina A.A., Lobov V.P., Davydov I.V., Malysheva O.V. Obtaining *in vitro* Culture of Plants of Large Cranberry and Swamp Cranberry. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod. Series: Biology*, 2006, no. 1, pp. 88–90. (In Russ.).

2. Инишева Л.И., Аристархова В.Е., Порохина Е.В., Боровкова А.Ф. Выработанные торфяные месторождения, их характеристика и функционирование. Томск: ТГПУ, 2007. 224 с.

Inisheva L.I., Aristarkhova V.E., Porokhina E.V., Borovkova A.F. *Depleted Peat Deposits, Its Characteristics and Functioning*. Tomsk, TSPU Publ., 2007. 224 p. (In Russ.).

3. Калашникова Е.А. Клеточная инженерия растений. М.: РГАУ-МСХА, 2012. 317 с.
Kalashnikova E.A. *Plant Cell Engineering*. Moscow, RSAU - MTAA Publ., 2012. 317 p. (In Russ.).

4. Кухарчик Н.В., Кастрицкая М.С., Семенов С.Е., Колбанова Е.В., Красинская Т.А., Волосевич Н.Н., Соловей О.В., Змушко А.А., Божидай Т.Н., Рундя А.П., Малиновская А.М. Размножение плодовых и ягодных растений в культуре *in vitro*. Минск: Беларуская навука, 2016. 208 с.

Kukharchik N.V., Kastritskaya M.S., Semenas S.E., Kolbanova E.V., Krasinskaya T.A., Volosevich N.N., Solovey O.V., Zmushko A.A., Bozhiday T.N., Rundya A.P., Malinovskaya A.M. *Reproduction of Fruit and Berry Plants in Culture in vitro*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016. 208 p. (In Russ.).

5. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

The Forest Code of the Russian Federation Dated December 4, 2006 No. 200-ФЗ. (In Russ.).

6. Мохамед Г.Р.А., Хуснетдинова Л.З., Тимофеева О.А. Укоренение микрочеренков *Vaccinium corymbosum* L. сорта Блю Берри в культуре *in vitro* и *ex vitro* // Сам. науч. вестн. 2018. Т. 7, № 4(25). С. 80–84.

Mohamed G.A., Khusnetdinova L.Z., Timofeeva O.A. Rooting of *Vaccinium corymbosum* L. Microshoots cv. “Blue-Berry” in Culture *in vitro* and *ex vitro*. *Samara*

Journal of Science, 2018, vol. 7, no. 4(25), pp. 80–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.17816/snv201874114>

7. Паспорт национального проекта «Экология»: утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24.12.2018 № 16). 48 с.

Passport of the National Project "Ecology". Approved by the Presidium of the Presidential Council for Strategic Development and National Projects (Minutes of December 24, 2018 No. 16). 48 p. (In Russ.).

8. Сирин А.А., Минаева Т.Ю., Новиков С.М., Хорошев П.И., Красильников Н.А., Калинина Н.А., Гриневиц Н.А., Грешнов С.П., Горбатовский В.В., Кураева Е.Н., Лапшина Е.Д., Межнев А.П., Мищенко А.Л., Стародубцева О.А., Федотов Ю.П., Черкасов А.Ф., Юрковская Т.К. Торфяные болота России: к анализу отраслевой информации / под ред. А.А. Сирина, Т.Ю. Минаевой. М.: Геос, 2001. 190 с.

Sirin A.A., Minayeva T.Yu., Novikov S.M., Khoroshev P.I., Krasil'nikov N.A., Kalinina N.A., Grinevich N.A., Greshnov S.P., Gorbatovskiy V.V., Kurayeva E.N., Lapshina E.D., Mezhev A.P., Mishchenko A.L., Starodubtseva O.A., Fedotov Yu.P., Cherkasov A.F., Yurkovskaya T.K. *Peat Bogs of Russia: To the Analysis of Industry Information*. Ed. by A.A. Sirin, T.Yu. Minayeva. Moscow, Geos Publ., 2001. 190 p. (In Russ.).

9. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года: утв. распоряжением Правительства РФ от 11.02.2021 № 312-р. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

The Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation for the Period up to 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation Dated February 11, 2021 No. 312-p. (In Russ.).

10. Тяк Г.В., Курлович Л.Е., Тяк А.В. Биологическая рекультивация выработанных торфяников путем создания посадок лесных ягодных растений // Вестн. Казан. ГАУ. 2016. Т. 11, № 2(40). С. 43–46.

Tyak G.V., Kurlovich L.E., Tyak A.V. Biological Recultivation of Degraded Peatlands by Creating Forest Berry Plants. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*, 2016, vol. 11, no. 2(40), pp. 43–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/20633>

11. Шевелуха В.С., Воронин Е.С., Калашикова Е.А., Ковалев В.М., Ковалев А.А., Кочиева Е.З., Новиков Н.Н., Прокофьев М.И., Пронина Н.Б., Проворов Н.А., Свентицкий И.О., Тихонов И.В., Тихонович И.А. Сельскохозяйственная биотехнология / под ред. В.С. Шевелухи. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2008. 710 с.

Shevelukha V.S., Voronin E.S., Kalashnikova E.A., Kovalev V.M., Kovalev A.A., Kochiyeva E.Z., Novikov N.N., Prokof'yev M.I., Pronina N.B., Provorov N.A., Sventitskiy I.O., Tikhonov I.V., Tikhonovich I.A. *Agricultural Biotechnology*. Ed. by V.S. Shevelukha. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008. 710 p. (In Russ.).

12. Clapa D., Bunea C., Borsai O., Pintea A., Hârța M., Ștefan R., Fira A. The Role of Sequestrene 138 in Highbush Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) Micropropagation. *HortScience*, 2018, vol. 53, iss. 10, pp. 1045–1049. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13269-18>

13. Clapa D., Fira A., Vescan L.-A. Aspects Regarding the *in vitro* Culture and *ex vitro* Rooting in *Vaccinium macrocarpon* Cultivar 'Pilgrim'. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Animal Science and Biotechnologies*, 2012, vol. 69, no. 1-2, pp. 226–234. <http://dx.doi.org/10.15835/buasvmcn-asb:69:1-2:8489>

14. Debnath S.C. Zeatin-Induced One-Step *in vitro* Cloning Affects the Vegetative Growth of Cranberry (*Vaccinium macrocarpon* Ait.) Micropropagules over Stem Cuttings. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2008, vol. 93, pp. 231–240. <https://doi.org/10.1007/s11240-008-9366-0>

15. Debnath S.C., McRae K.B. A One-Step *in vitro* Cloning Procedure for Cranberry (*Vaccinium macrocarpon* Ait.). *Small Fruits Review*, 2005, vol. 4, iss. 3, pp. 57–75. https://doi.org/10.1300/J301v04n03_05
16. Filipenia V.L. et al. Peculiarities of Adventitious Organogenesis of *Vaccinium macrocarpon* Ait. *in vitro*. *Blueberry and Cranberry Growing (with Ecological Aspects): Proceedings of the International Scientific Conference*. Skierniewice, 2006, pp. 217–223.
17. Guo Y.-X., Zhao Y.-Y., Zhang M., Zhang L.-Y. Development of a Novel *in vitro* Rooting Culture System for the Micropropagation of Highbush Blueberry (*Vaccinium corymbosum*) Seedlings. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2019, vol. 139, pp. 615–620. <https://doi.org/10.1007/s11240-019-01702-7>
18. Litwińczuk W. Micropropagation of *Vaccinium* sp. by *in vitro* Axillary Shoot Proliferation. *Protocols for Micropropagation of Selected Economically-Important Horticultural Plants*. Ed. by M. Lambardi, E. Ozudogru, S. Jain. Totowa, NJ, Humana Press, 2012, pp. 63–76. https://doi.org/10.1007/978-1-62703-074-8_5
19. Lomtadze N., Alasania N., Gorgiladze L., Meladze R. Production of Sapling Material of Blueberry in *in vitro* Culture. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 138–144.
20. Mihaljević S., Salopek-Sondi B. Alanine Conjugate of Indole-3-Butyric Acid Improves Rooting of Highbush Blueberries. *Plant, Soil and Environment*, 2012, vol. 58, iss. 5, pp. 236–241. <https://doi.org/10.17221/34/2012-PSE>
21. Noormets M., Karp K., Paal T. Recultivation of Opencast Peat Pits with *Vaccinium* Culture in Estonia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. Vol. 64: *Ecosystems and Sustainable Development IV*, 2003, vol. 2, pp. 1005–1014. <https://doi.org/10.2495/ECO030242>
22. Qiu D., Wei X., Fan S., Jian D., Chen J. Regeneration of Blueberry Cultivars through Indirect Shoot Organogenesis. *HortScience*, 2018, vol. 53, iss. 7, pp. 1045–1049. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13059-18>
23. Qu L., Polashock J., Vors N. A Highly Efficient *in vitro* Cranberry Regeneration System Using Leaf Explants. *HortScience*, 2000, vol. 35, iss. 5, pp. 948–952. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.35.5.948>
24. Reed B.M., Abdelnour-Esquivel A. The Use of Zeatin to Initiate *in vitro* Cultures of *Vaccinium* Species and Cultivars. *HortScience*, 1991, vol. 26, iss. 10, pp. 1320–1322. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.26.10.1320>
25. Ružić D., Vujović T., Libiakova G., Cerović R., Gajdošova A. Micropropagation *in vitro* of Highbush Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Journal of Berry Research*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 97–103. <https://doi.org/10.3233/JBR-2012-030>
26. Sedlák J., Paprštein F. Micropropagation of Cranberry (*Vaccinium macrocarpon*) through Shoot Tip Cultures: Short Communication. *Horticultural Science*, 2011, vol. 38, no. 4, pp. 159–162. <https://doi.org/10.17221/115/2010-HORTSCI>
27. Vahejõe K., Albert T., Noormets M., Karp K., Paal T., Starast M., Värnik R. Berry Cultivation in Cutover Peatlands in Estonia: Agricultural and Economical Aspects. *Baltic Forestry*, 2010, vol. 16, no. 2(31), pp. 264–272.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Обзорная статья


УДК 630*385.114

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-103-118


Гидромелиорация в лесном хозяйстве: история научных исследований

Б.В. Баби́ков, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAM-9500-2020](https://orcid.org/0000-0003-3280-572X)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3280-572X>

М.Б. Субо́та , *канд. с.-х. наук, доц.*; *ResearcherID: [AAM-9484-2020](https://orcid.org/0000-0003-3721-8604)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3721-8604>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194064; babikov_boris32@mail.ru, subota_m@mail.ru 

Поступила в редакцию 27.05.20 / Одобрена после рецензирования 03.09.20 / Принята к печати 05.09.20

Аннотация. В лесах России заболоченные земли занимают более 220 млн га. Только на болота приходится более 100 млн из них. На переувлажненных территориях произрастают низкобонитетные, малопродуктивные древостои. Значительная часть таких земель безлесна. Многолетний опыт гидромелиорации показал возможность выращивания здесь высокобонитетных древостоев естественного или искусственного происхождения. Примером служит Лисинский учебно-опытный лесхоз. Ранее в Лисино из 28 тыс. га нормальные древостои занимали 25–30 % площади; болота – более 30 %, значительная часть их была безлесна. В настоящее время, после проведения гидромелиорации, на болота приходится немногим более 4 % территории. В практике лесного хозяйства есть значительные, но в большей степени разовые исследования эффективности осушения. В данной статье рассмотрены многолетние исследования, проведенные одновременно в древостоях различного состава и возраста, что позволило установить особенности, определяющие лесоводственный эффект осушения. Лесоводственная эффективность осушения в значительной степени зависит от нормы осушения – степени понижения уровня грунтовых вод осушительными каналами. После гидромелиорации всегда наблюдается увеличение прироста древостоев, однако эффективность осушения и объем прироста определяются богатством торфа, типом болота, что предсказуемо по зольности торфа. Многолетние исследования на стационарных землях выявили, что на богатых евтрофных болотах можно вырастить древостой I класса бонитета с запасом до 500–600 м³/га. Установлено, эффективность осушения зависит и от исходного состава древостоя. В богатых по составу относительно разновозрастных древостоях более высок и прирост; в разновозрастных древостоях возможен отпад старых деревьев, и, следовательно, вероятно временное снижение прироста. Исследования показали, в смешанных по составу древостоях эффективность осушения повышается за счет регулирования состава древостоя рубками ухода.

Ключевые слова: гидромелиорация, болото, эффективность осушения, стационарные исследования, бонитет, базисная плотность древостоя, Лисино

Для цитирования: Бабиков Б.В., Субота М.Б. Гидромелиорация в лесном хозяйстве: история научных исследований // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 103–118. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-103-118>

Review article

Hydromelioration in Forestry: History of Research

Boris V. Babikov, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAM-9500-2020](https://orcid.org/0000-0003-3280-572X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3280-572X>

Marina B. Subota✉, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAM-9484-2020](https://orcid.org/0000-0003-3721-8604), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3721-8604>

Saint Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation; babikov_boris32@mail.ru, subota_m@mail.ru✉

Received on May 27, 2020 / Approved after reviewing on September 3, 2020 / Accepted on September 5, 2020

Abstract. Wetlands cover more than 220 mln ha of Russia's forests. Swamps alone represent more than 100 mln of them. There are low-quality and low-yield stands on waterlogged areas. Much of such land is treeless. Many years of hydromelioration have shown the possibility of growing here high-quality stands of natural or artificial origin. The Lisino Training and Experimental Forest serves as an example. Earlier in Lisino out of 28 ths ha normal stands covered 25–30% of the area; swamps – more than 30 %, a significant part of them was treeless. Currently, after hydromelioration, swamps represent slightly more than 4 % of the territory. There are significant, but largely ad hoc, studies of drainage efficiency in forestry practice. This article considers multi-year studies carried out simultaneously in stands of different composition and age, which allowed defining the features that determine the silvicultural effect of drainage. The forestry efficiency of drainage largely depends on the drainage rate – the degree of lowering of the groundwater level by drainage channels. After hydromelioration, there is always an increase in stand growth, however, the efficiency of drainage and the volume of stand growth is determined by the abundance of peat, the type of swamp, which is predictable by the ash content of peat. Multi-year studies on stationary lands have shown that it is possible to grow stands of the I quality class with a stock of up to 500–600 m³/ha on abundant eutrophic swamps. It was found that the drainage efficiency also depends on the stand initial composition. In relatively single-age stands, which are rich in composition, growth is also higher; in mixed-age stands, old trees may fall off and, therefore, growth is likely to decrease temporarily. Studies have shown that in mixed stands the efficiency of drainage is increased by regulating the stand composition by improvement thinning.

Keywords: hydromelioration, swamp, drainage efficiency, stationary studies, quality class, basic stand density, Lisino

For citation: Babikov B.V., Subota M.B. Hydromelioration in Forestry: History of Research. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 3, pp. 103–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-103-118>

Площадь избыточно увлажненных земель в лесах России превышает 220 млн га, или составляет около 12 % общей площади лесных земель страны. В некоторых районах европейской части России – Псковской, Архангельской,



Вологодской и Ленинградской областях на заболоченные земли приходится до 40–45 % территории. В Новосибирской и Омской областях болота и заболоченные земли занимают до 47–55 % территории.

Гидромелиорация лесных земель развивалась по мере организации лесного хозяйства и подготовки специалистов в этой отрасли. В 1803 г. был образован Санкт-Петербургский лесной институт, первоначально находившийся в Царском селе. Лисинские леса являлись ближайшим ненарушенным лесным участком. С 1805 г. воспитанники института проходили здесь практику «по лесным наукам». Организованного хозяйства в Лисино тогда не было. В 1805 г. «Лисинская дача» из Управления уделов была передана в распоряжение Министерства финансов, определена необходимость создания специализированного лесного хозяйства. По указу министра финансов графа Е.Ф. Канкрин начал готовить специалистов по лесному делу. В 1830 г. принято решение о создании Лисинского учебного лесничества и лесной школы при нем [12].

Леса в Лисино были не нарушены цивилизацией, но не очень хороши по состоянию. Как писал в 1833 г. первый лисинский лесничий А. Малышев, лесная школа основана в лесной глуши, на смрадных болотах и сразу была осознана необходимость осушения земель – с 1834 по 1841 г. проложили 32 км осушительных каналов. Эффективность проявилась на общей осушенности территории Лисино и на росте леса [12]. Однако, так как осушительные работы осуществлялись без проектного обоснования, выявились недостатки. Осушительные каналы устраивались в виде траншей без откосов, не выдерживались продольные уклоны канав, что приводило к заболачиванию пониженных мест, где собиралась вода из переполняемых канав.

В 1841 г. в Лисино на площади около 28 400 га проведено первое лесоустройство (возможно, первое и в России). Болота и заболоченные земли на тот момент занимали в лесничестве 31,3 % территории. Значительны были размеры крупных болот: Хейновское – более 2000 га, Рамболовское – 763 га, Кузнецовское – 675 га, Кауштинское – 270 га, Суланда – около 200 га (и даже 350 га с прилегающими заболоченными землями), а также др. Лесная территория была разделена на участки, создана сеть с кварталами размером 1×1 версту (1080 м). Квартальная сеть с того времени не менялась и сейчас можно оценить динамику состояния леса в кварталах на всей территории лесничества в разных лесорастительных условиях.

С 1841 г. осушительные работы расширились и проводились более организованно. В числе первых было осушено болото Суланда и прилегающие территории. Осушительные каналы проведены на расстоянии 180–250 м друг от друга и более [4]. Работы по осушению велись постепенно и начинались с расчистки ручьев. На Суланде выкопано около 15 км канав, хотя работы и проводились вручную, они выполнены в кратчайший срок (1841–1843 гг.). Специального проекта по осушению Суланды не составлялось, действовали «интуитивно». В результате в 1842–1845 гг. в Лисино расчищено ручьев и вырыто новых каналов – 640 км. Осушенная площадь составила около 5 тыс. га.

В Лисино впервые проведено осушение и по проекту – осушение Хейновского болота (рис. 1). Предварительно проведена тщательная нивелировка, на основании чего составлен и опубликован [13] проект осушения («отводнения»).



Рис. 1. План осушительной сети Хейновского болота (оттиск из [13] 1847 г.)

Fig. 1. Plan of the drainage network of the Kheynovskoye swamp (reprint from [13] 1847)

Проект подготовлен капитаном корпуса лесничих, выпускником Петербургского лесного института И.Г. Войнюковым. Проект включал строительство главного канала протяженностью более 3 км, впадающего в него большого канала длиной более 8 км. В эти каналы вводилась сеть побочных каналов, общая протяженность которых составила около 66 км. Если использовать современную терминологию, то можно сказать, что были запроектированы магистральный канал, собирательные каналы (собиратели) и осушители. Предварительно тщательно изучено состояние почв торфяной залежи.

С 1879 по 1900 г. в Лисинском лесничестве проводились работы по осушению Рамболовского, Кауштинского, Кузнецовского болот и др. Всего за 70-летний период в Лисино осушено около 7 тыс. га болот и заболоченных земель.

Оценивая в 1931 г. результаты осушения, П. Орлов отмечал [10], что площадь заболоченных земель к этому времени составила 1732 га, или 6,3 % от площади лесничества.

Первые оценки эффективности осушения даны на основе визуальных наблюдений. Значительная часть Суланды до проведения гидромелиорации характеризовалась как территория, покрытая низкобонитетным древостоем, частично пригодным для заготовки дров. Встречались и безлесные участки.

Экспериментальные данные по 114-му кварталу осушенной Суланды впервые приведены в дипломной работе П.М. Шиндина [15], где говорилось, что на исследуемом участке до осушения произрастал 70-летний еловый древостой IV класса бонитета (табл. 1).

Таблица 1

Изменение древостоя в 114-м квартале Лисинского лесничества (болото Суланда и прилегающие территории) после осушения

Table 1

Changes in the forest stand in the 114th quarter of the Lisino Forestry (Sulanda swamp and adjacent areas) after drainage

Год	Состав	Возраст, лет	Высота, м	Полнота	Класс бонитета
1841	6Е2С2Б	70	–	0,6	IV
1856	7С2Б1Е	10	–	0,7	II
1896	7С2Б1Е	45	17	0,7	I
1935	8С1Е1Б	85	21	0,9	I–II

По-видимому, после осушения старый древостой был вырублен. Через 10 лет сформировался новый древостой. С 1896 г. преобладающей породой становится сосна. Осушение в большей степени проявилось вблизи осушительных каналов. Запас древостоя здесь в 1935 г. достигал 370 м³/га, в 110 м от осушительных каналов – примерно 300 м³/га.

По мере формирования сомкнутого высокобонитетного древостоя увеличивался расход влаги на транспирацию, водный режим почв несколько выравнивался по всей площади между каналами. Выровнялось и состояние древостоя. По данным В.В. Пахучего [11], в 1983 г. на Суланде произрастает древостой I–II классов бонитета с запасом 400–500 м³/га. На определенных участках он превышает 620 м³/га. Безлесных участков нет.

С 1879 по 1900 г. в Лисино работала экспедиция по исследованию и осушению болот под руководством И.К. Августиновича. Осушение проводилось на Рамболовском, Кудровском, Кауштинском и Рубецком болотах. Было устроено 292 км новых каналов и отремонтировано 62 км существующих каналов и ручьев.

Оценивая результаты осушения лесных земель в Лисино, лисинский лесничий Д.М. Кравчинский в очерке «Лисинская казенная лесная дача» [8] (1911 г.) отмечал, что моховые болота и заболоченные земли, занимавшие в 1841 г. около 30 % территории лесничества, сократились почти в 2 раза и теперь на их площадь приходится только около 17 %.

На Рамболовском болоте, которое Д.М. Кравчинским отнесено к неудачно осушенным, по данным настоящего времени, результаты осушения различны. Исследования, проведенные кафедрой почвоведения и гидромелиорации Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета [3], показали, что после осушения ранее безлесное Рамболовское болото к 1980 г. покрылось лесом II–V классов бонитета (табл. 2).

Из приведенных данных видно, что после осушения на болоте произрастает древостой достаточно высокого класса бонитета, встречающийся там, где сохранилась действующая старая осушительная сеть. В настоящее время из 763 га Рамболовского болота, ранее не покрытого лесом, только около 100 га представлено мозаично расположенными безлесными участками.

Таблица 2

Характеристика древостоя на Рамболовском болоте в 1980 г.

Table 2

Characteristics of the forest stand at the Rambolovskoye swamp in 1980

Состав	Средние		Полнота	Запас, м ³ /га	Класс бонитета	Зольность почвы
	высота, м	диаметр, см				
10С50	10	10	0,52	70	IV	2,8
10С140	8	12	0,61	92	V	2,9
10С130+Е	23	24	0,85	322	III	3,1
6С1304Е+Б	26	28	0,81	340	II	4,8
10С80+Б	8	12	0,40	64	V	3,5

Исследования осушенной части Кауштинского болота [3] показали, что и здесь есть участки с достаточно высокими показателями осушения (табл. 3). Лучший рост наблюдается в условиях, где сохранилась действующая сеть осушительных каналов, преимущественно в периферийной части болота.

Таблица 3

Характеристика древостоя на Кауштинском болоте в 1980 г.

Table 3

Characteristics of the forest stand at the Kaushtinskoye swamp in 1980

Состав древостоя	Средние		Полнота	Запас, м ³ /га	Класс бонитета	Зольность почвы
	высота, м	диаметр, см				
10С80+Б	19	20	0,85	224	II	3,8
10С80	5	10	0,32	13	Va	2,3
10С70+Б	9	10	0,42	65	V	3,8
9С80+1Б	17	14	0,86	178	II	7,5
10С120	14	20	0,63	145	V	2,8

Особенно удачным оказалось осушение Хейновского болота. Здесь после осушения повсеместно сформировался высокобонитетный древостой. Однако в 40–60 гг. прошлого столетия лес по большей части вырубил, так как торфяная залежь была использована для изготовления торфяных отопительных брикетов. На территории Хейновского болота, не затронутой торфоразработкой, и в настоящее время произрастает высокобонитетный хвойный древостой (табл. 4).

Таблица 4

Характеристика древостоя на Хейновском болоте в 1983 г.

Table 4

Characteristics of the forest stand at the Kheynovskoye swamp in 1983

Мощность торфа, м	Состав	Средние		Полнота	Запас, м ³ /га	Класс бонитета
		высота, м	диаметр, см			
1,3	5С135 4Е125 1Б120+Е40	26,7	29,8	1,1	540	II
1,4	10С140	24,6	29,3	0,6	290	II
	7Е130 3Б120	17,0	18,8	0,3	120	

За 70-летний период до 1935 г. в Лисино было осушено более 7 тыс. га болот и заболоченных земель, что составляет около 25 % территории лесхоза. Последние осушительные работы проведены в 1972–1973 гг. на площади более 1300 га. В настоящее время площадь неосушенных болот и заболоченных территорий составляет около 4,2 %. Безлесных болот практически нет [2]. Заболочивание может происходить на вырубках [7]. Однако в Лисинском лесничестве отсутствуют крупные лесосеки, а на узких лесосеках за счет естественного возобновления в течение 3–5 лет древостой восстанавливается.

Гидромелиорация принципиально изменила лесорастительные условия на месте «смердных болот», как отмечал А. Малышев, сформировала богатую растительность. Флора Лисинского лесничества в настоящее время представлена более чем 500 видами травянистой, кустарниковой, кустарничковой и древесной растительности [6]. Встречаются древостои практически всех типов леса [16], свойственных данной лесорастительной зоне.

Многолетние наблюдения за изменением состояния древостоев и осушительной сети позволили разработать параметры каналов осушительной сети и интенсивности осушения, профили каналов, что учитывается при проектировании осушительной системы и в настоящее время.

Объекты, где проводится гидромелиорация, как правило, различны по составу и возрасту древостоев. Различны и лесорастительные условия: богатство почвы, вид и характер сложения обычно осушаемой торфяной залежи – определяющие условия формирования древостоев после осушения. Гидромелиорация требует финансовых затрат, поэтому важны сроки окупаемости работ, что связано с состоянием осушаемых древостоев и периодом возможности их использования после осушения.

Для проведения комплексных многолетних исследований по изучению роста леса и изменения торфяной залежи на объектах гидромелиорации кафедрой почвоведения и гидромелиорации в Лисино в 1973 г. заложен специальный стационар Малиновский [4], включенный в перечень «Мелиоративно-болотные стационары России» [9]. Стационар расположен на Туровском болоте и прилегающих к нему заболоченных землях Малиновского лесничества Лисинского учебно-опытного лесхоза (рис. 2). На землях стационара проводятся лесоводственные, гидрологические (включая изучение водного баланса), геоботанические, почвенные и другие исследования.

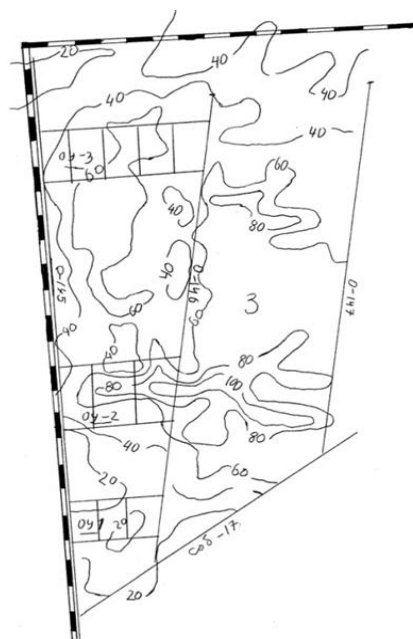


Рис. 2. Стационар Малиновский

Fig. 2. Malinovskiy station

- ~40~ Изолиния мощности торфа
- Квартальная просека
- 3 Номер квартала
- ОУ Опытный участок
- 0-145... Осушительный канал
- Соб Собирающий канал

Основной целью гидромелиорации переувлажненных земель является максимально возможное увеличение прироста древостоя [20] при минимальном воздействии на окружающую среду. Для изучения особенностей роста древостоя на торфяных почвах стационара было создано 3 опытных участка. Они располагались на всей полосе между каналами, разделяясь на пробные площади (ПП) для изучения прироста по мере удаления от канавы. Расстояние между каналами на опытных участках составляло соответственно 93, 100 и 156 м. При расстоянии между каналами до 100 м участок разделялся на 3 ПП, при больших расстояниях – на 5.

Болотная часть стационара до осушения 1973 г. была представлена маломощными торфяно-болотными почвами с глубиной торфа 0,2–0,9 м. На торфяно-глеевые почвы приходилось 28,7 %; на болотно-подзолистые – 24,5 %; на подзолистые – 23,4 %.

В первые годы после осушения при понижении уровня грунтовых вод торф осел и уплотнился. Осадка торфа способствует его разложению выделяющимся CO_2 [5]. Величина осадки зависит от мощности торфа и интенсивности осушения. На интенсивно осушенном участке 1 при исходной глубине торфа 0,2–0,3 м осадка за первые 5 лет составила 6–10 см, на слабоосушенном участке 3 при глубине торфа 0,5–0,9 м – 11–22 см. На экстенсивно осушенном участке 2 глубина торфа была, как на 1-м, – 0,2–0,3 м.

Со временем интенсивность осадки торфа снизилась. За следующие 15 лет на участке 1 она составила 3–9 см, т. е. менее 1 см в год. На участке 2 – 1–4 см за 15 лет. Далее мощность торфяного горизонта менялась мало [14], поскольку сработка торфа восполняется ежегодным опадом листвы и хвои. На осушенном в 1841 г. болоте Суланда образовавшийся слой торфа 0,3–0,4 м сохраняется до настоящего времени.

Мало меняется с годами и зольность торфа. Изменились морфологическое строение торфяной почвы и тип почвы. Торфяно-глеевые и торфяно-болотные маломощные почвы в 1974 г. занимали 52 % территории. Через 20 лет, в 2004 г., они встречались на 44 % площади. Торфянисто-подзолисто-глеевые и торфяно-подзолисто-глеевые в 1974 г. составляли 25 % стационарных земель. В 2004 г. образовались перегнойно-подзолистые почвы, занимавшие 10 % территории. С 5 до 7 % увеличилась доля подзолистых почв.

После гидромелиорации изменились условия почвенного питания. Актуальная кислотность почвы увеличилась с 3,0–3,8 до 3,6–4,0. Существенно снизилась гидролитическая кислотность почвы в корнеобитаемой зоне – с 125,0–136,5 до 65,4–114,5.

Таксационные характеристики древостоев по участкам существенно различались. Состояние древостоя в год осушения приведено в табл. 5.

Наиболее сложный состав древостоя был на участке 1. Основная порода, сосна II–III классов возраста, сформировала здесь 1-й ярус, занимая от 12 до 48 % состава. 2-й ярус представлен березой – 80–90 % в составе.

Участок 2 характеризовался практически чистым по составу сосновым древостоем III–IV классов бонитета достаточно высокой полноты и разного возраста.

Таблица 5

Таксационные характеристики древостоев в 1974 г.

Table 5

Inventory characteristics of forest stands in 1974

ПП	Ярус	Порода	Средние		Полнота	Запас, м ³ /га	Состав	Класс бонитета	
			высота, м	диаметр, см					
<i>Участок 1</i>									
1	I	С	8,8	10,1	0,08	9,7	32,3	8Б2С	IV
	II	Б	6,3	4,8	0,52	22,6			
2	I	С	15,2	17,6	0,21	46,7	66,7	8С2Б	IV
	II	Б	6,6	4,4	0,41	20,0			
3	I	С	11,9	15,1	0,32	19,7	33,2	6С4Б	IV
	II	Б	5,8	4,0	0,11	13,5			
<i>Участок 2</i>									
4	I	С	13,6	17,8	0,53	105,0	113,0	9С1Б	IV
	II	Б	6,0	5,5	0,17	7,5			

Окончание табл. 5

ПП	Ярус	Порода	Средние		Полнота	Запас, м ³ /га		Состав	Класс бонитета
			высота, м	диаметр, см					
5	I	С	15,4	18,1	0,67	153,0	162,0	10С+Б	IV
	II	Б	9,3	6,3	0,12	8,6			
6	I	С	13,1	17,2	0,53	102,0	108,0	10С+Б	III
	II	Б	6,2	4,1	0,13	6,0			
<i>Участок 3</i>									
7	I	С	3,1	4,1	0,06	1,8	2,0	9С1Б	Va
	II	Б	2,6	1,7	0,20	0,2			
8	I	С	3,4	4,1	0,14	4,4	4,6	10С+Б	Va
	II	Б	2,8	1,8	0,01	0,2			
9	I	С	4,1	5,0	0,19	7,6	8,2	10С+Б	Va
	II	Б	3,3	2,9	0,03	0,6			
10	I	С	4,3	5,2	0,18	7,7	8,7	10С+Б	Va
	II	Б	4,0	3,3	0,04	1,0			
11	I	С	5,3	6,8	0,18	0,3	1,3	9С1Б	Va
	II	Б	4,0	3,4	0,04	1,0			

Участок 3 характеризовался низкополнотным, небольшим по высоте, преимущественно сосновым древостоем классов бонитета V–Va. Внешне участок представлял собой болото, покрытое редкостойным сосновым лесом, просматривавшимся вдаль на сотни метров (рис. 3).



Рис. 3. Верховое болото на опытном участке 3 (1974 г.)

Fig. 3. Oligotrophic swamp on the experimental area 3 (1974)

После гидромелиорации за счет действия каналов и транспирации произошло снижение уровня грунтовых вод. В первый год осушения на участках 1 и 2 грунтовые воды располагались на глубине 26–32 см, на участке 3 – на глубине 18–19 см. Со временем сформировался высокобонитетный древостой (рис. 4), через 30 лет рост его оценивался I–II классом бонитета.



Рис. 4. Сосновый древостой на опытном участке 3 через 30 лет после осушения

Fig. 4. Pine forest 30 years after drainage on the experimental area

В табл. 3 приведена таксационная характеристика древостоя через 30 лет после осушения. К этому времени на участке 1 и 2 сформировались древостой I–Ia классов бонитета с запасом до 400–500 м³/га. В высокобонитетном древостое увеличились транспирационный расход влаги и суммарное испарение. Грунтовые воды понизились в среднем за период вегетации до 50–60 см. В отдельные летние периоды грунтовые воды располагались ниже уровня дна осушительных каналов.

Отмечено понижение уровня грунтовых вод и на слабоосушенном участке 3, где сформировался древостой I–II классов бонитета. Здесь в отдельные летние периоды грунтовые воды понижались до глубины 49–56 см.

Многолетние стационарные исследования [2, 3] показали, что темпы прироста в разных древостоях неодинаковы. Обычно улучшение водного режима после гидромелиорации сопровождается увеличением прироста. Однако в разновозрастных древостоях есть свои особенности. Вначале увеличивается общий прирост, но за счет отпада разновозрастных деревьев возможно его снижение, что и было отмечено в наших исследованиях (см. табл. 3).

На участке 1 до осушения преобладающей породой была береза I–II классов возраста, IV класса бонитета. Здесь на 1-й ПП доля сосны в составе немного превышала единицу (8Б2С). Сосна на торфяной почве в данном случае более отзывчива на осушение, чем другие породы, потому после гидромелиорации состояние древостоя изменилось. Определяющее место в составе заняла сосна – 30–40 % по запасу. При проведении лесоводственного ухода в виде прореживания в таких условиях можно создать преимущественно сосновый древостой. Запас древостоя через 40 лет после осушения достиг 300–400 м³/га (см. табл. 3), при том что до осушения он был лишь 30–60 м³/га.

На участке 2 до осушения преобладала сосна V класса возраста. Общий запас древостоя в год осушения равнялся 115–150 м³/га, класс бонитета – IV. Через 40 лет запас древостоя составил 430–490 м³/га; годичный прирост – 7–8 м³/га; класс бонитета – I–Ia. За 1-е десятилетие прирост оказался 7,6 м³/га в год, во второе снизился – 7,4 м³/га в год. Затем, в 4-м десятилетии, увеличился до 7,9–9,9 м³/га в год.

На участке 3, до осушения имевшем вид болота, поросшего редкостойной сосной класса бонитета Va с запасом древесины 1–3 м³/га, после гидромелиорации через 40 лет сформировался сосновый древостой I–II класса бонитета [8] с запасом древесины 121–320 м³/га (табл. 6).

Таблица 6

Таксационные характеристики древостоев в 2014 г.

Table 6

Inventory characteristics of forest stands in 2014

ПП	Ярус	Средние		Полнота	Запас, м ³ /га	Состав	Класс бонитета	
		высота, м	диаметр, см					
<i>Участок 1</i>								
1	I	25,4	32,7	0,31	132	32,3	10С90	Ia
	II	19,1	–	1,05	274		5Б603Е2Ос	
2	I	26,4	36,9	0,40	174	66,7	10С100	I–Ia
	II	18,2	–	0,51	131		6Б704Е	
3	I	23,3	34,3	0,20	76	33,2	10С90	I
	II	17,4	–	0,98	225		8Б702Е+С+Ос	
<i>Участок 2</i>								
4	I	24,7	29,0	0,80	337	113,0	10С130	I
	II	12,7	–	0,56	91		5Б805Е30	
5	I	28,3	28,4	0,84	443	162,0	10С130	Ia
	II	12,0	–	0,36	51		6Б804Е30	
6	I	21,6	28,5	0,88	315	108,0	10С130	II
	II	13,1	–	0,24	37		8Б802Е30	
<i>Участок 3</i>								
7	I	20,2	19,7	0,94	327	2,0	9С1001Б+Е	I–Ia
8	I	18,7	17,2	0,76	258	4,6	9С1001Б+Е	I
9	I	16,9	16,7	0,74	212	8,2	9С1001Б+Е	II
10	I	19,2	16,4	0,52	175	8,7	10С100+Б	I
11	I	20,2	18,2	0,63	227	1,3	9С1001Б+Е	I–Ia

После осушения интенсивно увеличиваются рост древостоя в высоту и прирост по диаметру [17]. Последнее обуславливает изменение базисной плотности стволовой части древостоя [1]. Осушение способствует увеличению годовичного кольца. Исследования показали, что базисная плотность действительно снизилась на 1–2 %, но при этом биомасса древесины на участке 1

стала больше в 4 раза, на участке 2 – в 2,4 раза, на участке 3 древостоя не было. Биомасса на землях стационара в целом увеличилась в 60 раз, особенно на участке 3. Наибольшую плотность имеют вновь сформировавшиеся молодые древостои.

Воднобалансовые исследования позволяют установить влияние осушения на водное питание рек [18]. Годовой сток по каналам осушительной сети на территории стационара составляет 27–35 % от количества осадков. Коэффициент стока – 0,39. При этом доля летнего стока (май–сентябрь) составила 16–23 % от годовой величины, что на 20–30 % выше по сравнению с рекой-водоприемником. Большая часть летнего стока – от 33 до 44 % – приходится на май, когда осуществляется сброс паводковых вод. На болотах после гидромелиорации сток равномерный, доля весеннего стока [19] меньше, чем в реках.

Наименьшая величина стока, вплоть до его остановки, наблюдается в июле. Следует отметить, что прекращение стока с небольших внутренних болотных естественных водотоков отмечается постоянно и в течение длительного времени.

При осушении значительных территорий, как было в Лисинском лесничестве, осушительные каналы можно использовать и для сплава древесины, заготавливаемой при рубках спелых древостоев в зоне осушения. В Лисино в 1937 г. построен крупный Кузнецовский осушительно-сплавной канал (рис. 5).



Рис. 5. Кузнецовский осушительно-сплавной канал

Fig. 5. Kuznetsovskiy drainage and rafting channel

Канал выполнял роль магистрального канала при осушении Кузнецовского болота, по этому каналу сплавлялась на территорию ее переработки заготавливаемая древесина. Канал подпитывался, кроме болотных вод, водами озера и обеспечивал водой пруды лесных питомников, а также поселок Лисино-Корпус.

Заключение

В настоящее время Лисинский учебно-опытный лесхоз с его почти двухвековым опытом осушения заболоченных лесов является уникальной площадкой для изучения эффективности гидромелиорации и ведения лесного хозяйства. Особенностью осушения лесных земель в отличие от сельскохозяйственных является то, что лес растет долго и результаты осушения поддаются оценке только спустя десятилетия и более. На примере многолетнего ведения лесного хозяйства на осушенных землях в Лисинском лесхозе можно судить о формировании и стабилизации новых почвенных условий, особенностях роста вновь созданных после вырубki спелых древостоев. После гидромелиорации переувлажненных земель изменились условия почвообразования, увеличилось число видов почв и типов леса. На ранее заболоченных землях удалось вырастить лес I–II классов бонитета.

В Лисино ведутся и почвенные исследования, начатые И.В. Тюриным и И.В. Пономаревой в 30-х гг. прошлого века и продолженные в 50-х Н.Л. Благовидовым с учениками. Исследование почв проводится сотрудниками кафедры почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета и сегодня. В 2011 г. издана монография «Почвы Лисинского лесничества». В Лисино изучают практику ведения лесного хозяйства студенты Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета, а также учащиеся Лисинского лесного техникума. Произрастают коренные леса, местами измененные в результате хозяйственной деятельности, в частности при выборочных рубках. Есть леса созданные (Н.И. Рубцовым) предварительными посадками леса до вырубki спелого древостоя. Сохранились посадки лесных культур с закрытой корневой системой, заложенные в 1970 г. А.В. Преображенским.

Лисино – место проведения крупных совещаний. В 1996 г. Российская академия наук организовала здесь экскурсию для участников II съезда почвоведов, посвященного 150-летию В.В. Докучаева. Кроме того, в 1995 г. в Лисино проведена экскурсия для участников Мирового конгресса ИЮФРО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алексеев А.С., Бабиков Б.В., Соловьев В.А., Шурыгин С.Г. Влияние лесосошения на прирост древостоев // Изв. СПбЛТА. 2007. № 179. С. 4–14.
Alekseev A.S., Babikov B.V., Solovjev V.A., Shurjigin S.G. The Influence of Forest Bogs Drainage on Scots Pine Tree Stands Growth. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2007, no. 179, pp. 4–14. (In Russ.).
2. Бабиков Б.В. Водный режим почв осушенных лесных болот // Почвоведение. 1980. № 2. С. 80–85.
Babikov B.V. Water Regime of Soils of Drained Forest Swamps. *Pochvovedenie*, 1980, no. 2, pp. 80–85. (In Russ.).
3. Бабиков Б.В., Шурыгин С.Г. Почвенно-гидрологические исследования в Лисинском учебно-опытном лесхозе. СПб.: СПбЛТА, 2006. 60 с.
Babikov B.V., Shurygin S.G. *Soil and Hydrological Research in the Lisino Training and Experimental Forest*. Saint Petersburg, SPbSFTU Publ., 2006. 60 p. (In Russ.).

4. Бабиков Б.В., Косарев В.П., Тимофеев А.И. Рост сосновых насаждений на осушенном болоте почвенно-гидромелиративного стационара Малиновский // Изв. СПбЛТА. 1996. № 3. С. 46–54.

Babikov B.V., Kosarev V.P., Timofeev A.I. Growth of Pine Plantations in the Drained Swamp of the Malinovskiy Soil-Hydromelioration Station. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 1996, no. 3, pp. 46–54. (In Russ.).

5. Вомперский С.Э., Иванов А.И. Влияние гидромелиорации на осадку торфа и выделение CO₂ // Гидролесомелиорация и ведение лесного хозяйства на осушенных землях. СПб., 1993. С. 57–60.

Vomperskiy S.E., Ivanov A.I. Effect of Hydromelioration on Peat Sedimentation and CO₂ Release. *Forest Hydromelioration and Forest Management on Drained Lands*. Saint Petersburg, 1993, pp. 57–60. (In Russ.).

6. Егоров А.А., Титов Ю.В. Флора Лисинского учебного опытного лесхоза. СПб.: ЛТА, 1997. 93 с.

Egorov A.A., Titov Yu.V. *Flora of the Lisino Training and Experimental Forest*. Saint Petersburg, LTA Publ., 1997. 93 p. (In Russ.).

7. Кошечев А.Л. Заболочивание вырубков и меры борьбы с ним. М.: АН СССР, 1955. 167 с.

Koshcheyev A.L. *Waterlogging of Clearcuts and Control Measures*. Moscow, AN SSSR Publ., 1955. (In Russ.).

8. Кравчинский Д.М. Лисинская казенная лесная дача. СПб., 1911. 24 с.

Kravchinskiy D.M. *Lisino State Forest Dacha*. Saint Petersburg, 1911. 24 p. (In Russ.).

9. Маслов Б.С., Константинов В.К., Бабиков Б.В., Ахти Э. Мелиоративно-болотные стационары России. Вантаа: Науч. центр Вантаа МЕТЛА, 2006. 397 с.

Maslov B.S., Konstantinov V.K., Babikov B.V., Akhti E. *Meliorative and Wetland Stations of Russia*. Vantaa, METLA Publ., 2006. 397 p. (In Russ.).

10. Орлов П. Осушительные работы в Лисинском учебном леспромхозе // Природа и хозяйство учебных леспромхозов Лесотехнической академии. Л., 1931. С. 207–211.

Orlov P. Drainage Works at the Lisino Training Lespromkhoz. *Nature and Economy of Educational Lespromkhpzes of the Forest Engineering Academy*. Leningrad, 1931, pp. 207–211. (In Russ.).

11. Пахучий В.В. Водный режим в хвойных древостоях на староосушенных торфяниках. Л.: Наука, 1985. 72 с.

Pakhuchiy V.V. *Water Regime in Coniferous Stands on Old-Drained Peatlands*. Leningrad, Nauka Publ., 1985. 72 p. (In Russ.).

12. Преображенский А.В. Вековой опыт ведения лесного хозяйства в Лисинском и Охтинском лесхозах. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1953. 116 с.

Preobrazhenskiy A.V. *A Century of Forest Management Experience in the Lisino and Okhta State Forestries*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1953. 116 p. (In Russ.).

13. Проект отводнения первого хозяйственного отделения Лисинской дачи // Изв. вузов. Лесн. журн. 1847. № 6.

Draft of the Water Drainage of the First Household Department of the Lisino Dacha. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 1847, no. 6. (In Russ.).

14. Тимофеев А.И., Савицкая С.Н. Почвы Лисинского лесхоза. СПб.: СПбПУ, 2011. 126 с.

Timofeev A.I., Savitskaya S.N. *The Soil of the Lisino Forestry*. Saint Petersburg, SPbSTU Publ., 2011. 126 p. (In Russ.).

15. Шиндин П.М. Влияние осушительной мелиорации на рост сосны в Суланде: диплом. работа. 1935. 98 с.

Shindin P.M. *Effect of Drainage Reclamation on Pine Growth in Sulanda*. Thesis. 1935. 98 p. (In Russ.).

16. Шишков И.И., Докудовский И.Е. Типы леса Лисинского учебно-опытного лесхоза и их хозяйственное использование. М.: Гослесбумиздат, 1963. 111 с.

Shishkov I.I., Dokudovskiy E.E. *Types of Forest of the Lisino Training and Experimental Forest and Their Use*. Moscow, Goslesbumizdat Publ., 1963. 111 p. (In Russ.).

17. Heikuzainon L. The Influence of Forest Drainage on Growth and Removal in Finland. *Acta Forestalia Fennica*, 1961, vol. 71, no. 8. 74 p. (In Fin.).

18. Huikari O., Paarlahti K., Paavilainen E., Ravela H. On the Effect of Stripwidth and Ditch Depth on the Water Economy and Runoff on Peat Soil. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, 1966, vol. 61(8). 39 p. (In Fin.).

19. Seuna P. Influence of Forestry Draining on Runoff and Sediment Discharge in the Ylijoki Basin, North Finland. *Aqua Fennica*, 1982, no. 12, pp. 3–16. (In Fin.).

20. Zalis P. *Meskopilas piteksnasa – cisumi*. Riga, 2006. 218 p. (In Latv.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*181:581.526

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-119-129

Особенности роста вяза приземистого на бурых почвах Астраханской полупустыни

В.В. Лепеско¹, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [AAD-9953-2020](https://orcid.org/0000-0003-2111-9636),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2111-9636>

Л.П. Рыбашлыкова², канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр.; ResearcherID: [W-4197-2018](https://orcid.org/0000-0002-3675-6243),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3675-6243>

¹Богдинская научно-исследовательская агролесомелиоративная опытная станция, ул. БОС, д. 1, г. Харабали, Астраханская обл., Россия, 416010; bossharabali@mail.ru

²Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, просп. Университетский, д. 97, г. Волгоград, Россия, 400062; ludda4ka@mail.ru

Поступила в редакцию 01.10.20 / Одобрена после рецензирования 07.12.20 / Принята к печати 10.12.20

Аннотация. Дана оценка современного состояния и предложены способы дополнительного обеспечения влагой почвогрунтов под устойчивыми древесными насаждениями вяза приземистого (*Ulmus pumila* L.) на бурых почвах полупустыни. Территория района исследований относится к аридной зоне. Это безлесная зона сухой степи и полупустыни, где с 1949–1953 гг. было посажено около 1000 га насаждений с преобладанием вяза различных видов: древесные зонты, пастбищезащитные полосы, массивы, куртины. Почвы – бурые пустынно-степные солонцеватые супесчаные и легкосуглинистые в комплексе с солонцами (10 %). Древостои вяза приземистого образуют насаждения разного возраста и назначения. В основу исследований положены материалы биомониторинга и полевые опыты с использованием типовых методик лесной таксации. Для изучения древостоев вяза приземистого закладывали пробные площади прямоугольной формы размером 0,4 га. Подробно описывали местоположение пробных площадей, состав почвы на них, а также давали комплексную оценку роста и долговечности насаждений. Показано, что состояние древостоев определяют 2 комплекса факторов: зонально-эдафический и пасторально-хозяйственный. Жизнеспособные насаждения вяза приземистого в возрасте 57–64 лет сохранились на супесчаных и темноцветных почвах, находящихся в микро- и межбугровых понижениях. Динамика влажности почвогрунтов под насаждениями в основном не зависит от способа размещения деревьев. Удовлетворительные показатели роста и долговечности насаждений обуславливаются уровнем доступности почвенной влаги и степенью ее засоленности. Влагообеспеченность почвогрунтов под насаждениями вяза можно повысить за счет использования стока талых вод в потяжинах и микропонижениях, а также увеличения площади питания на одно дерево до 25 м². Сформировавшиеся насаждения вяза положительно реагируют на присутствие отдыхающего скота. «Союзные» отношения между древостоем и домашним скотом возникают не сразу, а с определенного возраста древостоя и момента формирования им определенного строения древесного яруса, что необходимо обеспечить лесокультурными и лесоводственными мероприятиями



в совокупности с регулированием пастбищной нагрузки. Выявлено положительное воздействие отдыхающего скота при соответствующей нагрузке на рост, состояние и долговечность куртинных насаждений вяза приземистого.

Ключевые слова: Астраханская полупустыня, вяз, зона бурых почв, защитные лесные насаждения, влагообеспеченность почвы, площадь питания дерева, домашний скот, рост древостоя, долговечность древесных насаждений

Для цитирования: Лепеско В.В., Рыбашлыкова Л.П. Особенности роста вяза приземистого на бурых почвах Астраханской полупустыни // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 119–129. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-119-129>

Original article

Growth Features of Siberian Elm on Brown Soils of the Astrakhan Semi-Desert

*Vladimir V. Lepesko*¹, Candidate of Agriculture, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [AAD-9953-2020](https://orcid.org/0000-0003-2111-9636), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2111-9636>

*Ludmila P. Rybashlykova*²✉, Candidate of Agriculture, Leading Research Scientist;

ResearcherID: [W-4197-2018](https://orcid.org/0000-0002-3675-6243), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3675-6243>

¹Bogdinskaya Scientific-Research Agroforest Amelioration Experimental Station, ul. BOS, 1, Kharabali, Astrakhan region, 416010, Russian Federation; bossharabali@mail.ru

²Federal Scientific Center for Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences, prosp. Universitetskiy, 97, Volgograd, 400062, Russian Federation; ludda4ka@mail.ru✉

Received on October 1, 2020 / Approved after reviewing on December 7, 2020 / Accepted on December 10, 2020

Abstract. The article presents the current state assessment and suggests the methods for additional moisture supply of soils under stable tree plantations of Siberian elm (*Ulmus pumila* L.) on brown soils of semi-desert. The research area belongs to the arid zone. This is a treeless zone of dry steppe and semi-desert, where about 1,000 ha of plantations with a predominance of elm of different species have been planted since 1949–1953: shade clumps, pasture protection strips, massifs, separated forest stands. The soils are brown desert-steppe alkaline sandy loam and light clay-loam in combination with solonetz (10 %). Siberian elm stands form plantations of different ages and for different purposes. The research is based on biomonitoring materials and field experiments using standard forest inventory techniques. Test sites of a rectangular shape with an area of 0.4 ha were laid out in order to study the Siberian elm stands. We described in detail the location of the test sites, the soil composition thereon, and gave a comprehensive assessment of the growth and durability of the plantations. It is shown that the stand state is determined by 2 sets of factors: zonal-edaphic and pastoral-economic. Viable stands of Siberian elm at the age of 57–64 have been preserved on sandy loam and dark-colored soils located in micro- and inter-hill depressions. The dynamics of soil moisture under plantations is largely independent of the tree location method. Satisfactory indicators of growth and durability of plantations depend on the level of availability of soil moisture and the degree of its salinity. The moisture supply of soils under elm plantations can be increased by using melt water runoff in hollows and micro-depressions and increasing the growing space of a tree to 25 m². Formed elm plantations respond positively to the presence of resting animals. The “alliance” relationship between the stand and livestock does not arise



immediately, but rather from a certain age of the stand and the moment it forms a certain structure of the tree layer, which should be provided by forest cultivation and silvicultural measures in conjunction with the regulation of pasture load. There is a positive effect of resting animals at the appropriate load on the growth, state and durability of the Siberian elm stands.

Keywords: Astrakhan semi-desert, elm, brown soil zone, protective forest plantations, moisture supply, growing space of a tree, livestock, stand growth, durability of tree plantations

For citation: Lepesko V.V., Rybashlykova L.P. Growth Features of Siberian Elm on Brown Soils of the Astrakhan Semi-Desert. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 119–129. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-119-129>

Введение

Актуальной задачей защитного лесоразведения на Юге России является создание долговечных лесонасаждений на природных пастбищах аридной зоны, оптимизация режимов их содержания и эксплуатации [7, 11–16].

Создать искусственные лесные насаждения в условиях степной и полупустынной зоны крайне трудно вследствие недостаточного количества атмосферных осадков, сдувающих снег сильных ветров, сухости климата, низкого положения грунтовых вод и засоленности почв [1, 2, 4, 9, 17–20]. Острый недостаток атмосферных осадков вместе с сильной жарой и другими факторами становится причиной низкой абсолютной и относительной влажности воздуха, которая в отдельные дни опускается до 0 %. В Астраханской полупустыне за апрель–июль бывает 30–50 суховейных дней [5].

На функционирующих пастбищах Астраханской полупустыни эффективны защитно-теневые древесные колки («зонты»). Они обеспечивают укрытие скота от солнцепека или холодных ветров во время дневного отдыха. Многолетняя практика создания зонтов показала, что в полупустынях Прикаспия лучшие редкостойные насаждения формируются из вяза приземистого [3]. В разных условиях их функциональная долговечность (период с момента создания до наступления возраста естественной спелости; способность эффективного длительного влияния на окружающую среду) изменяется от 2–3 до 5–7 десятилетий. Наличие таких объектов на пастбищах открывает возможность для изучения особенностей роста вязовых насаждений, повышения их устойчивости при создании, выращивании и содержании [6, 8, 10].

Цель исследования – оценить современное состояние почвогрунта и найти способы его дополнительного обеспечения влагой для создания устойчивых древесных насаждений вяза приземистого на бурых почвах в зоне полупустыни.

Объекты и методы исследования

Основу исследований составили полевые опыты и биомониторинг Астраханских степей с насаждениями из *Ulmus pumila* L. в виде массивов, полос и куртин. Для изучения древостоев вяза приземистого закладывали пробные площади прямоугольной формы размером 0,4 га. Территория проведения опытов относится к полупустынной зоне и характеризуется небольшим количеством осадков – 200–250 мм и большим испарением влаги, особенно в летний период (испаряемость – 800 мм/год, гидротермический коэффициент – 0,5–0,6).

Почва – бурая пустынно-степная солонцеватая супесчаная и легкосуглинистая в комплексе с солонцами (10 %). Классификацию почв по гранулометрическому составу выполняли по Н.А. Качинскому. Буровое зондирование толщи почвогрунта проводили на глубину 3 м. Запасы влаги определяли термостатно – весовым методом. Изменение запасов воды в почве считали как расход влаги насаждениями с апреля по сентябрь включительно.

На объектах изучения подробно описывали местоположение насаждений, рельеф, гранулометрический состав почвы, а также состояние напочвенного покрова. Характеристика насаждений дана с использованием принятых в таксации методик (А.П. Анучина, Т.Т. Битвинскаса, Н.А. Прозорова) и результатов почвенно-экологических исследований насаждений на 7 пробных площадях в разновозрастных древостоях. Деревья измеряли по 2-сантиметровым ступеням толщины на высоте 1,3 м. Для каждой ступени определяли средние высоту и диаметр дерева. Деревья распределяли по категориям состояния: здоровые, угнетенные, суховершинные и усохшие. Расчет индексов состояния древостоев проводили по формуле: $(100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4) / N$, где n_1 – количество здоровых деревьев, n_2 – ослабленных, n_3 – сильно ослабленных, n_4 – усыхающих, N – общее число деревьев (включая сухостой). Классификация насаждений по индексам состояния следующая. К здоровым относили деревья, имеющие индекс 1,0–1,5; к ослабленным – 1,6–2,5; к сильно ослабленным – 2,6–3,5; к отмирающим – 3,6–4,5; к погибшим – >4,6. Статистическую обработку полученных данных осуществляли с помощью программы Excel 2020.

Результаты исследования и их обсуждение

Рекогносцировочное обследование древостоев вяза приземистого показало, что от искусственных посадок 50-х гг. XX столетия в условиях Астраханской полупустыни на песчаных почвах сохранилось лишь 24 % насаждений (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика обследованных насаждений вяза приземистого

Table 1

Characteristics of the surveyed Siberian elm plantations

№	Объект	Площадь, га	Живые деревья, шт./га	Здоровые деревья, шт./га	Сомкнутость полога	Высота крепления живой кроны, м	Диаметр приствольных корней, м	Состояние подпологового пространства
1	Куртина	7,5	378	343	0,3–0,4	1,4	1,0–1,2 (до 10 %)	Задернение 50–60 %
2	Госполоса	1,4	458	335	0,4	1,5	0,7–1,2 (до 10 %)	Задернение 50–60 %
3	Госполоса	0,6	210	35	0,2–0,3	1,4	0	Задернение 80–85 %
4	Зонт	0,3	28	22	0,1	1,4	1,0–1,2 (до 70–80 %)	Задернение 80 %

Окончание табл. 1

№	Объект	Площадь, га	Живые деревья, шт./га	Здоровые деревья, шт./га	Сомкнутость полога	Высота крепления живой кроны, м	Диаметр приствольных корней, м	Состояние подпологового пространства
5	Куртина	0,12	80	55	0,7	1,3	1,3 (до 20 %)	Задернение в среднем 40 %
6	Лесной массив	4	210	150	0,3–0,9	1,5	1,0–2,0 (до 60 %)	Лесная обстановка, очаговое задернение до 20 %
7	Лесной массив	3	105	0	0,15	1,5	0,5 (до 3 %)	Остепнение

По условиям тепло- и влагообеспеченности относительно средних многолетних значений отклонения в среднем небольшие, но в отдельные годы значительные. В 2018 и 2019 гг. отмечалось низкое количество осадков за вегетационный период. При изучении водного режима почвогрунта в насаждениях вяза установлена зависимость расхода продуктивной влаги насаждениями и состояния древостоя (табл. 2).

Жизнеспособные насаждения вяза приземистого 57–64 лет сохранились лишь на объектах № 4 и 6 на супесчаных и темноцветных почвах, находящихся в микро- и межбугровых понижениях. В период вегетации расход влаги составил 294–517 мм. Исключением является объект № 1, который расположен на песчаных землях, но имеет площадь питания на одно дерево достаточную (25 м²) для удовлетворительного роста насаждений.

По результатам исследования динамики водного режима на различных по увлажнению участках (при недоступности грунтовой воды) определен водный баланс местообитания древостоя вяза с разным объемом годового водопотребления: свыше 300 мм/год (объект № 6), 200–300 мм/год (объект № 5), 90–150 мм/год (объект № 1) и менее 90 мм/год (объекты № 3 и 7).

Наибольшие ранневесенние запасы влаги отмечены на объекте № 6, в межбугровом понижении, – 915 мм. Расход продуктивной влаги составил 517 мм, причем, чем больше поступило дополнительной влаги за счет талых вод, тем больше оказался расход влаги древостоем за вегетационный период. По мере приближения осени не было дефицита влаги, и к концу вегетационного периода слой почвы 0–300 см имел 70 мм доступной влаги. Для сравнения на объектах № 1 и 5 к осени 2019 г. доступная влага составила 30–50 мм.

Исследования показали, что наличие в межбугровом понижении (объект № 6) продуктивной влаги обеспечивает хороший рост и долговечность древостоя вяза приземистого: в 64 года его средняя высота достигла 9 м (табл. 3). Деревья вяза на объекте № 7 (почвы легкосуглинистые) на пологом возвышении расходуют всю доступную влагу – 56 мм. К концу вегетационного периода запасы влаги находятся на уровне влажности устойчивого завядания и ниже.

Показатели состояния и роста древостоя вяза на этом объекте значительно ниже (табл. 3) по сравнению с показателями насаждения на объекте № 6.

Таблица 2

**Расход влаги насаждениями вяза приземистого в слое почвы (0–300 см)
за вегетационный период**

Table 2

**Moisture consumption by Siberian elm plantations in the soil layer (0–300 cm)
during the growing season**

№	Объект	Почва	Возраст, лет	Состояние древостоя	Изменение запасов продуктивной влаги, мм
1	Куртина	Песчаная, солей нет	68	Жизнеспособный	93,4
2	Госполоса	Песчаная, солей нет	67	Ослабленный	82,2
3	Госполоса	Легкосуглинистая, слабое засоление до 1 м, хлоридный тип (0,01 %)	66	Сильно ослабленный	63,1
4	Зонт	Супесчаная, солей нет	57	Ослабленный	294,3
5	Куртина	Супесчаная, соли на глубине 65–100 см (0,01 %), хлоридный тип	26	Жизнеспособный	240,3
6	Лесной массив	Легкосуглинистая, соли на глубине 240–250 см (0,01 %)	64	Жизнеспособный	516,7
7	Лесной массив	Легкосуглинистая, слабое засоление до 1 м, хлоридный тип (0,01 %)	64	Сильно ослабленный	56,2

Примечание: За гидрологический год (с октября по сентябрь) выпало 200 мм осадков, что ниже многолетней нормы.

За период исследования насаждений текущий прирост по высоте составил 3,1–33,7 см. Наибольший показатель наблюдается у вяза на объекте № 5 в куртине (возраст – 26 лет) – 33,7 см. Условия увлажнения и площади питания деревьев вяза приземистого сказались на их росте в высоту, по диаметру и на развитии крон (табл. 4).

Таблица 3

Средний и текущий прирост по высоте на объектах исследований, 2019 г.

Table 3

Average and current increment in height at the study sites, 2019

№	Объект	Высота дерева, м	Диаметр		Прирост по высоте, см	
			ствола, см	кроны, м	средний	текущий
1	Куртина	4,4±0,6	19,7±1,3	5,2×5,8	7,0	18,0
2	Госполоса	3,9±0,3	16,7±0,9	5,0×5,3	6,0	4,0
3	Госполоса	3,7±1,2	12,6±1,5	3,5×3,8	5,8	6,5
4	Зонт	6,6±0,8	31,0±1,9	6,5×5,8	11,0	14,3
5	Куртина	5,0±1,5	16,2±1,1	4,4×3,9	21,5	33,7
6	Лесной массив	8,8±0,3	32,2±0,9	11,0×9,3	14,3	23,8
7	Лесной массив	3,5±0,8	14,4±1,1	3,3×2,8	5,6	3,1

Таблица 4

Жизнеспособность и рост вяза на песчаных почвах в зависимости от площади питания, 2019 г.

Table 4

Viability and growth of elm on sandy soils depending on the growing space, 2019

Объект (площадь питания дерева, м ²)	Высота дерева, м	Диаметр		Прирост по высоте, см	
		кроны, м	ствола, см	средний	текущий
Куртина (25)	4,4±0,6	5,2×5,8	19,7± 1,3	7,0	18,0
Госполоса (20)	4,0±0,3	4,7×5,1	17,0±1,1	6,1	15,0
Госполоса (15)	3,7±1,2	4,1×4,5	12,8±1,6	6,0	10,3
Госполоса (10)	3,1±1,5	3,4×3,6	10,3±0,6	5,0	5,2

Так, средняя высота вяза при площади питания дерева 25 м² в 1,5, текущий прирост по высоте в 3,5 и наличие продуктивной влаги в 3–4 раза больше, чем при площади питания дерева 10 м².

По результатам осмотра старовозрастных древостоев выявлено, что их состояние определяют 2 комплекса факторов: зонально-эдафический и пасторально-хозяйственный. Вопреки лесоводственным законам, в неблагоприятных лесорастительных и зооэкологических условиях между древостоями и животными могут возникать «союзные» отношения. Насаждения древесных пород, создавая защиту от солнца и ветра, привлекают скот. Его концентрация

под кронами и на опушках кроме негативных последствий – поднятия крон, повреждения стволов – имеет и позитивные результаты: уничтожение травостоя, рыхление и удобрение почвы, улучшение ее водно-минерального режима посредством создания небольших ямок – блюдца для сбора осадков. Улучшаются условия роста, и повышается долговечность насаждений. Инвентаризация оставшихся вязовых насаждений на территории Харабалинского района (Астраханское Заволжье) и изучение состояния древостоев на выбранных объектах позволяют утверждать, что лучшими ростом и устойчивостью характеризуются насаждения, контактирующие со скотом (табл. 5, 6).

Таблица 5

Показатели роста насаждений вяза, используемых животными для отдыха в полуденный зной (объект № 5)

Table 5

Growth rates of elm plantations used by animals for resting in the midday heat (site No. 5)

Контакт с животными	Деревья, шт.		Сомкнутость полога	Высота, м		Диаметр			Состояние	
	живые	здоровые		дерева	крепления живой кроны	кроны, м	ствола, см	приствольных оголенных корней, м	подполого пространства	древостоя
Есть	28	22	0,8	5,9± ±1,4	1,3	5,6± ±1,1	20,0± ±1,3	1,4	Лесная обстановка	Жизнеспособный
Нет	19	10	0,6	4,0± ±0,3	1,3	3,2± ±0,8	12,3± ±1,6	0	Задерживание до 70–80 %	Ослабленный

Примечание: Возраст насаждений 26 лет; площадь куртины в контакте со скотом и без – по 0,03 га; высота измерялась только у здоровых деревьев.

Таблица 6

Расход влаги древостоем вяза в слое (0–300 см) за вегетационный период в зависимости от наличия влияния животных (объект № 5, 2019 г.)

Table 6

Moisture consumption by an elm stand in a layer (0–300 cm) during the growing season depending on the occurrence impact produced by animals (site No. 5, 2019)

Контакт с животными	Изменение запасов продуктивной влаги, мм	Продуктивная влага в конце вегетации, мм
Есть	240	52
Нет	152	27

Однако союзные отношения между древостоем и домашним скотом возникают не сразу, а начинаются с определенного возраста древостоя и момента формирования им определенного строения древесного яруса, что необходимо обеспечить лесокультурными и лесоводственными приемами, а также регулированием пастбищной нагрузки. Только сформировавшиеся насаждения вяза положительно реагируют на присутствие отдыхающего скота, а в первые 4–5 лет (до достижения высоты 3–4 м) деревья необходимо охранять от травоядных животных, чтобы избежать потрав и гибели молодых вязов.

В куртинах, зеленых зонтах и части лесного массива площадью до 1 га и возрастом около 30 и 70 лет пребывание животных на протяжении 15–30 лет не имело отрицательного влияния на рост и состояние вяза приземистого. Пастбища животных, напротив, оказывает на лесной биоценоз положительное влияние. Дополнительная влагообеспеченность вяза, контактирующего со скотом, в 1,6 раза больше, чем вяза без влияния животных, и составляет в течение вегетации 240 мм.

На объекте № 6 в межбугровом понижении на темноцветных почвах при наличии дополнительной влаги от стока талых вод и контакта насаждений со скотом (расход влаги за вегетационный период 517 мм) древостой является жизнеспособным и в 64 года его высота составляет 8–10 м.

Экспериментально установлено (Ф.М. Касьянов), что для укрытия от прямой солнечной радиации и нормального размещения животных в среднем требуется насаждение площадью: для овец – 2,5–3 м² на голову, для крупного рогатого скота (КРС) – 10–15 м² на голову. Так как площадь эффективного теневого покрытия в полуденное время в насаждениях не превышает 40–60 % общей площади, рассчитанную норму площади теневой поверхности удваивают. Площадь куртины вяза (объект № 5), контактирующей с животными (КРС, лошади), – 300 м². Этого достаточно для размещения 15 голов КРС или 50 голов овец.

По наблюдениям в течение летнего периода 2018 и 2019 гг. куртину вяза приземистого систематически посещали от 5 до 10 голов КРС и лошадей.

Заключение

Исследованиями установлено, что в жестких природно-климатических условиях Астраханской полупустыни успешность выращивания древесных пород в значительной степени обусловлена почвенно-гидрологическими условиями. Жизнеспособные насаждения вяза приземистого 57–64 лет сохранились на супесчаных и темноцветных почвах, находящихся в микро- и межбугровых понижениях. Долговечность вяза приземистого в этой зоне определяют в основном 2 фактора: наличие продуктивной влаги в почвогрунте и степень его засоленности.

В аридных условиях влагообеспеченность почвогрунтов под насаждениями вяза можно повысить за счет следующих приемов:

в потяжинах и микропонижениях использование стока талых вод и создание для сбора осадков ямок-блюдец посредством контакта приствольных кругов деревьев с домашними травоядными животными во время их отдыха;

на песчаных землях увеличение площади питания на одно дерево до 25 м² и осуществление выпаса домашнего скота, уничтожающего травянистую растительность под пологом насаждений, создающего ямки-влагонакопители; соблюдение правил агротехники для накопления и сбережения влаги. Дополнительная влагообеспеченность вяза в контакте со скотом в 1,6 раза больше, чем без влияния животных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вдовенко А.В. Специфика формирования лесопастбищных угодий, закустаренных лохом в районе Среднего Дона // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса: наука и высш. проф. образование. 2015. № 2(38). С. 85–90.

Vdovenko A.V. Formation Specificity on Pastures, Overgrown by *Elaeagnus Angustifolia* Bushes in the Middle Don Regions. *Proceedings of Nizhnevolskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*, 2015, no. 2(38), pp. 85–90. (In Russ.).

2. Вдовенко А.В., Кладиев А.К. Продуктивность кормовых угодий Волго-Маньчского междуречья с участием древесного яруса в Республике Калмыкия // Изв. Нижневолжск. агроунивер. комплекса: наука и высш. проф. образование. 2014. № 2(34). С. 60–65.

Vdovenko A.V., Kladiev A.K. Productivity of Forage Lands in Volga-Manychsky Interriver with Canopy Participation of in the Republic of Kalmykia. *Proceedings of Nizhnevolskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education*, 2014, no. 2(34), pp. 60–65. (In Russ.).

3. Завьялов А.А., Иоюз А.П. Некоторые итоги селекции вяза в сухой степи юго-востока европейской территории России // Междунар. журн. приклад. и фундамент. исслед. 2019. № 3. С. 66–70.

Zavyalov A.A., Iozus A.P. Some Results of Elm Breeding in the Dry Steppe of the South-East of the European Russia. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2019, no. 3, pp. 66–70. (In Russ.).

4. Крючков С.Н., Маттис Г.Я. Лесоразведение в засушливых условиях. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2014. 301 с.

Kryuchkov S.N., Mattis G.Ya. *Afforestation in Arid Conditions*. Volgograd, VNIALMI Publ., 2014. 301 p. (In Russ.).

5. Кулик Н.Ф., Зюзь Н.С., Маттис Г.Я. Защитные лесные насаждения на крайнем Юго-Востоке и повышение их эффективности // Вестн. с.-х. науки. 1974. № 6. С. 79–90.

Kulik N.F., Zyuz' N.S., Mattis G.Ya. Protective Forest Plantations in the Far South-East and Increasing Their Effectiveness. *Vestnik sel'sko-khozyaystvennoy nauki*, 1974, no. 6, pp. 79–90. (In Russ.).

6. Лепеско В.В., Рыбашлыкова Л.П. Современное состояние, устойчивость и долговечность искусственных насаждений вяза мелколистного в различных лесорастительных условиях Астраханского Заволжья // Природообустройство. 2019. № 5. С. 118–124.

Lepesko V.V., Rybashlykova L.P. The Contemporary State, Stability and Durability of Artificial Plantations of Small-Leaved Elm under a Variety of Forest Conditions of the Astrakhan Volga Region. *Prirodoobustroystvo*, 2019, no. 5, pp. 118–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2019-5-118-124>

7. Манаенков А.С. Лесомелиорация арен засушливой зоны. 2-е изд., перераб. и доп. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. 428 с.

Manayenkov A.S. *Forest Reclamation of Arid Zone Arenas*. Volgograd, FNTs agroekologii RAN Publ., 2018. 428 p. (In Russ.).

8. Русакова Е.Г., Заболотная М.В. Основные древесные породы лесного фонда Астраханской области // Естеств. науки. 2011. № 1(34). С. 22–31.

Rusakova E.G., Zabolotnaya M.V. Basic Wood Species of Forest Resources of Astrakhan Region. *Estestvennyye nauki*, 2011, no. 1(34), pp. 22–31. (In Russ.).

9. Тютюма Н.В., Булахтина Г.К., Кудряшов А.В., Кудряшова Н.И. Мелиоративная эффективность кустарниковых кулис на аридных пастбищах юга России // Аридные экосистемы. 2020. Т. 26, № 1(82). С. 62–68.

Tyutyuma N.V., Bulakhtina G.K., Kudryashov A.V., Kudryashova N.V. Meliorative Efficiency of Shrub Wings on Arid Pastures of the South of Russia. *Arid Ecosystems*, 2020, vol. 26, no. 1(82), pp. 62–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1993-3916-2020-10084>

10. Akhmedenov K.M. Analysis of the Afforestation Status in the Arid Conditions of Western Kazakhstan. *Biology Bulletin*, 2018, vol. 45, iss. 10, pp. 1153–1158. <https://doi.org/10.1134/S1062359018100023>

11. Lepesko V.V., Belyaev A.I., Pleskachev Yu.N., Fomin S.D., Pugacheva A.M., Rybashlykova L.P. Monitoring the State and Ecological Ameliorative Effect of Tree and Shrub Coulture and Row Plantings on Pastures in the Arid Conditions of the Northern Caspian. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 341, art. 012103. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012103>

12. Muratchaeva P.M.-S. Monitoring of the Condition of Tree Species in Artificial Plantings of the Terek-Kuma Lowland. *Arid Ecosystems*, 2014, vol. 4, iss. 1, pp. 35–38. <https://doi.org/10.1134/S2079096114010053>

13. Radochinskaya L.P., Kladiyev A.K., Rybashlykova L.P. Production Potential of Restored Pastures of the Northwestern Caspian. *Arid Ecosystems*, 2019, vol. 9, iss. 1, pp. 51–58. <https://doi.org/10.1134/S2079096119010086>

14. Sapanov M.K. Environmental Implications of Climate Warming for the Northern Caspian Region. *Arid Ecosystems*, 2018, vol. 8, iss. 1, pp. 13–21. <https://doi.org/10.1134/S2079096118010092>

15. Sapanov M.K., Sizemskaya M.L. Influence of Climate Change on Groundwater Level and the State of Pine Plantations on the Sands of the Caspian Lowland. *International Scientific Publications. Ecology & Safety*, 2018, vol. 12, pp. 128–134.

16. Sapanov M.K., Sizemskaya M.L., Akhmedenov K.M. Reclamation Stages and Modern Use of Arid Lands in the Northern Caspian Region. *Arid Ecosystems*, 2015, vol. 5, iss. 3, pp. 188–193. <https://doi.org/10.1134/S2079096115030105>

17. Su H., Li Y., Liu W., Xu H., Sun O.J. Changes in Water Use with Growth in *Ulmus pumila* in Semiarid Sandy Land of Northern China. *Trees*, 2014, vol. 28, pp. 41–52. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0928-3>

18. Vollenweider P., Menard T., Arend M., Kuster T.M., Günthardt-Goerg M.S. Structural Changes Associated with Drought Stress Symptoms in Foliage of Central European Oaks. *Trees*, 2016, vol. 30, iss. 3, pp. 883–900. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1329-6>

19. Wesche K., Walther D., von Wehrden H., Hensen I. Trees in the Desert: Reproduction and Genetic Structure of Fragmented *Ulmus pumila* Forests in Mongolian Drylands. *Flora*, 2011, vol. 206, iss. 2, pp. 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2010.01.012>

20. Yan Q., Zhu J., Zheng X., Jin C. Causal Effects of Shelter Forests and Water Factors on Desertification Control during 2000–2010 at the Horqin Sandy Land Region, China. *Journal of Forestry Research*, 2015, vol. 26, iss. 1, pp. 33–45. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0012-x>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest



Научная статья

УДК 630.36

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-130-138

Модернизация валочно-сучкорезно-раскряжевочного механизма лесного харвестера

К.П. Рукомойников[✉], *д-р техн. наук, доц.*; *ResearcherID: N-6961-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

Е.М. Царев, *д-р техн. наук, доц.*; *ResearcherID: AAB-2166-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

С.Е. Анисимов, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: AAB-1346-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3332-0927>

Д.С. Татаринов, *аспирант*; *Researcher ID: AAB-7031-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3312-796X>

В.О. Купцова, *соискатель*; *ResearcherID: AAY-9130-2020*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4330-0594>

Т.А. Гилязова, *соискатель*; *Researcher ID: AFY-3945-2022*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, 424000; RukomojnikovKP@volgatech.net[✉],
CarevEM@volgatech.net, denistatarinov4@mail.ru, vika13244@rambler.ru,
tat-gilyazova@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.05.20 / Одобрена после рецензирования 03.08.20 / Принята к печати 07.08.20

Аннотация. В настоящее время отмечается ежегодный рост числа современных лесозаготовительных машин на лесозаготовительных предприятиях РФ и зарубежных стран. При этом парк лесозаготовительных машин становится все более разнообразным и многофункциональным, а их производители, борясь за рынки сбыта продукции, оказываются заинтересованы в постоянной модернизации существующих и развитии новых конструктивных и технологических решений. Цель исследования – поиск нового технического решения, которое позволит наряду с заготовкой качественных сортиментов выполнять их частичную окорку без существенного снижения скорости обработки. Эффективный результат достигается тем, что предложенный нами новый способ обработки стволов деревьев, предусматривающий, как и в традиционном варианте функционирования харвестерной (процессорной) головки, раскряжевку ствола пильным механизмом и очистку от сучьев сучкорезными ножами, дает возможность пролыски лесоматериалов – снятия коры поваленного дерева полосами по всей его длине – а также удаления луба (частично или полностью). Это ускоряет естественную сушку древесины при ее хранении на складах, значительно повышает плавучесть хвойных тонкомерных сортиментов при их дальнейшем лесосплаве. Внедрение предложенного варианта заготовки на лесосеке окоренных лесоматериалов и рабочего органа харвестеров (процессоров) для осуществления такой заготовки повысит долю отходов лесосечных работ на лесосеке. Конструкция новой харвестерной (процессорной) головки не предусматривает значитель-



ных финансовых затрат на модернизацию и позволяет осуществить пролыску лесоматериалов продольными полосами по всей длине выпиливаемых бревен без наличия дополнительного привода рабочих механизмов. Это даст возможность реализовать грубую окорку с минимальными финансовыми затратами уже на стадии лесосечных работ и повысит эффективность деятельности лесозаготовительных и лесообрабатывающих предприятий.

Ключевые слова: харвестерная головка, процессорная головка, окорка, коросниматель, пролыска, кора, валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина

Благодарности: Работа выполнена с использованием ресурсов ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-674).

Для цитирования: Рукомойников К.П., Царев Е.М., Анисимов С.Е., Татаринов Д.С., Купцова В.О., Гилязова Т.А. Модернизация валочно-сучкорезно-раскряжевочно-го механизма лесного харвестера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 130–138. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-130-138>

Original article

Upgrading the Feller-Delimiter-Crosscutter Mechanism of a Forest Harvester

Konstantin P. Rukomojnikov[✉], Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

Evgeny M. Tsarev, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAB-2166-2020](https://orcid.org/0000-0001-5695-3028),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-3028>

Sergey E. Anisimov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-1346-2020](https://orcid.org/0000-0003-3332-0927), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3332-0927>

Denis S. Tatarinov, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAB-7031-2020](https://orcid.org/0000-0002-3312-796X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3312-796X>

Viktoriia O. Kuptcova, External PhD Student; ResearcherID: [AAY-9130-2020](https://orcid.org/0000-0002-4330-0594),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4330-0594>

Tatiana A. Gilyazova, External PhD Student; Researcher ID: [AFY-3945-2022](https://orcid.org/0000-0001-6067-7185),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6067-7185>

Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russian Federation; RukomojnikovKP@volgatech.net[✉], CarevEM@volgatech.net, denistatarinov4@mail.ru, vika13244@rambler.ru, tat-gilyazova@yandex.ru

Received on May 13, 2020 / Approved after reviewing on August 3, 2020 / Accepted on August 7, 2020

Abstract. There is an annual increase in the number of modern forestry machines at logging enterprises both in Russia and in foreign countries. At the same time, the fleet of forestry machines is becoming more diverse and multifunctional, and their manufacturers, competing for market outlets, find themselves interested in constant upgrading of existing and development of new design and technological solutions. The research is aimed at finding a new engineering solution that will allow along with harvesting high-quality logs to perform their partial debarking without a significant reduction in the processing speed. The effective result is achieved by the fact that the proposed new method of processing tree trunks provides the possibility of timber barking in strips, i.e. removing the bark from a fallen tree along its

entire length, as well as bast removal (partially or completely). The method involves, as in the traditional model of harvesting (processing) head functioning, crosscutting of the trunk by the sawing mechanism and delimiting by delimiting knives. This leads to accelerated natural drying of wood during its storage in the warehouses and significantly increases the floatability of thin coniferous logs during their further timber floating. The implementation of the proposed option of harvesting debarked timber at the logging site and the working body of harvesters (processors) to carry out such harvesting will increase the share of logging waste at the logging site. The design of the new harvesting (processing) head does not require significant financial expenses for its upgrading. The design of the new harvester head allows the logs to be barked in strips along the entire length. Additional drive of working mechanisms is not required. This will enable the implementation of rough debarking with minimal financial costs already at the stage of logging operations and increase the efficiency of logging and timber processing enterprises.

Keywords: harvesting head, processing head, debarking, barking tool, barking in strips, bark, feller-delimber-crosscutter

Acknowledgments: The research was carried out with the support from the Core Facility Centre “Ecology, Biotechnology and Processes for Producing Environmentally Friendly Energy Carriers” of the Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, and funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2021-674).

For citation: Rukomojnikov K.P., Tsarev E.M., Anisimov S.E., Tatarinov D.S., Kuptcova V.O., Gilyazova T.A. Upgrading the Feller-Delimiter-Crosscutter Mechanism of a Forest Harvester. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 3, pp. 130–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-130-138>

Введение

Рост объемов производства и стремление к улучшению качественных показателей продукции лесопромышленных предприятий, а также к сокращению экологических последствий на территориях вырубок делают очевидной перспективность широкого внедрения прогрессивных технологических комплексов для ведения работ в лесу. В настоящее время ежегодно увеличивается число современных лесозаготовительных машин на лесозаготовительных предприятиях РФ и зарубежных стран. При этом парк лесозаготовительных машин становится все более разнообразным и многофункциональным, а производители в борьбе за рынки сбыта стараются постоянно совершенствовать существующие и предлагать новые конструктивные и технологические решения.

Анализ многообразия современных видов лесозаготовительных машин позволяет утверждать, что все возрастающий интерес потребителей вызывают машины, способные реализовать сразу несколько технологических операций. Наиболее функциональными из числа этих машин можно с уверенностью назвать харвестеры, способные обеспечивать валку деревьев и очистку их от сучьев с одновременной раскряжкой [3, 9]. Схожими конструктивными особенностями рабочих органов обладают и процессоры, выполняющие аналогичные обрабатывающие операции [19].

Функционально-технологический анализ вариантов модернизации рабочих органов харвестеров и процессоров [1] дает возможность оценить целесообразные пути совершенствования технологического оборудования. Очевидно, что внимание исследователей в вопросах развития технологического оборудо-

вания должно быть направлено в первую очередь на модернизацию наиболее востребованных лесозаготовительных машин и повышение их функциональности [2, 4, 8, 10]. При сложившихся закономерностях существования потребительского рынка это научное и практическое направление исследований является актуальным и перспективным.

Цель исследования – поиск нового технического решения, позволяющего наряду с заготовкой качественных сортиментов выполнять их частичную окорку без существенного снижения скорости обработки лесоматериалов.

Объекты и методы исследования

Идея разработки нового варианта модернизации харвестерной или процессорной (далее по тексту – харвестер, харвестерной) головки лесозаготовительных машин для повышения числа реализуемых ею функций и улучшения качества заготавливаемых сортиментов появилась после детального анализа новых вариантов технологического оборудования, описанных в патентах [6, 11–18, 20].

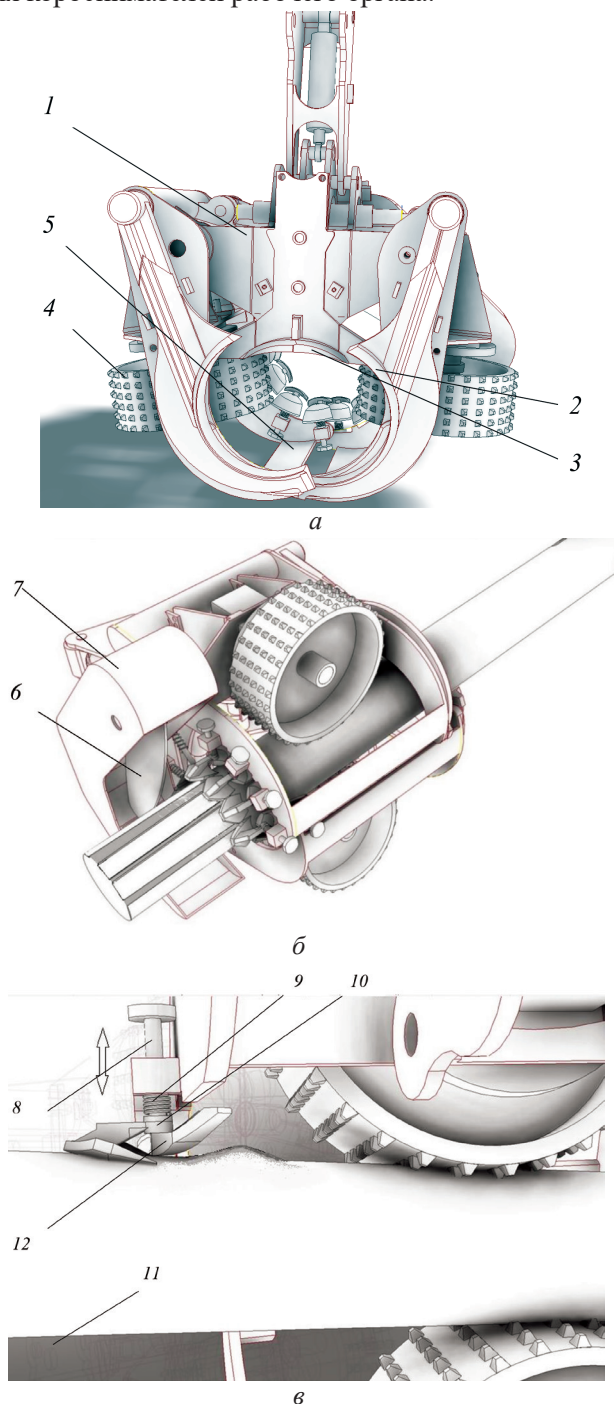
Анализ предложенных [6, 11–18, 20] технических решений позволил взять за основу разработки нового усовершенствованного механизма несколько конструкций рабочих органов харвестеров. В частности, отмечено техническое решение [5], отличающееся наличием режущего устройства для оцилиндровки бревен, установленного на корпусе вместе с сучкорезными ножами, раскрывающим и протаскивающим механизмами. Протаскивающий механизм состоит из нескольких поворотных и одного неповоротного вальца. Конструкция предусматривает установку сжимающих ствол дерева поворотных вальцов и приводящих их в движение гидромоторов на поворотной рамке, которая соединена с корпусом устройства посредством осевого соединения и имеет механизм поворота относительно него. Неповоротный валец конструкции и устройство для оцилиндровки бревен крепятся к корпусу при помощи гидроцилиндров. Устройство предназначено для обработки харвестером на лесосеке закомелистых сортиментов.

В качестве недостатка описанной конструкции можно отметить то, что данный способ обработки ствола и рабочий орган харвестера для осуществления обработки уменьшают производительность машины и не позволяют окорять бревна, это во многом снижает функциональные возможности данного механизма.

Другим похожим техническим решением, на которое было обращено внимание авторов статьи, является конструкция [7] для выработки окоренных сортиментов. Она отличается тем, что установленный на корпусе окорочный механизм выполнен в виде статора, поворачивающегося в параллельной действии пильного механизма плоскости и имеющего ротор, на который возможно установить подпружиненные коросниматели.

Однако скорость очистки ствола дерева от сучьев при использовании данного технического решения зависит от скорости окорки роторным механизмом, что приводит к резкому снижению производительности работы харвестера. Создание рабочего органа многооперационных лесных машин, позволяющего осуществлять заготовку окоренных бревен без снижения скорости работы, на данный момент является нерешенной задачей.

На рисунке представлены вид предложенной авторами статьи модернизированной конструкции харвестерной головки, процесс обработки ствола и общая схема движения короснимателей рабочего органа.



Модернизированная конструкция харвестерной головки:
a – вид устройства сверху; *б* – процесс обработки ствола;
в – схема работы короснимателей

Upgraded harvester head design: *a* – top view of the device;
б – stem processing; *в* – operation scheme of the barking tools

Конструкция модернизированного рабочего органа предусматривает наличие корпуса 1 с установленными на нем захватами 5, механизмами протаскивания и отмера отпиливаемых бревен. Механизм протаскивания состоит из нескольких протаскивающих валцов 4. Расположенные на конструкции подвижные элементы представляют собой единую систему, сжимающую ствол дерева так, что он оказывается между неподвижным сучкорезным ножом 3, монтируемым на корпусе в верхней его части, подвижными сучкорезными ножами 2 и протаскивающими валцами. В нижней части корпуса установлен защитный кожух 7, предохраняющий от повреждений пильный механизм 6 для раскряжевки лесоматериалов.

Основными новыми элементами конструкции являются установленные на осях 8 в нижней части корпуса и захваты направляющие лезвия 12, охватывающие по периметру ствол 11. Эти элементы имеют возможность движения перпендикулярно оси ствола при их прижиге к нему. Возврат направляющих лезвий в первоначальное положение при освобождении ствола дерева из захвата осуществляется пружинами 9. Навешенные на осях направляющих лезвий коросниматели 10 при работе устройства двигаются по траектории перемещения направляющих лезвий с учетом их возвратно-поступательных движений. Толщина слоя коры контролируется при выборе и настройке резцов короснимателей: они должны выступать за пределы задних частей направляющих лезвий на толщину слоя снимаемой коры.

Технологический процесс работы харвестера, оснащенного модернизированным рабочим органом, не отличается от стандартного процесса работы этой лесной машины. Оператор наводит харвестерную головку на ствол дерева, осуществляет его захват и валку с последующей обработкой. Захват сопровождается образованием кольца из короснимателей по периметру ствола. Направляющие лезвия, прижимаясь к поверхности ствола, перемещаются перпендикулярно его оси под действием создаваемого при прижиге усилия. Пружины на осях направляющих лезвий сжимаются. Коросниматели надежно прижимаются к стволу. Протаскивание ствола протаскивающими валцами приводит к продольному перемещению вдоль него направляющих лезвий и короснимателей. При встрече направляющих лезвий с неровностями ствола происходит перемещение осей направляющих лезвий перпендикулярно обрабатываемому стволу дерева. Движущиеся следом за ними коросниматели в точности копируют эти возвратно-поступательные движения, что обеспечивает одинаковую толщину снимаемого слоя коры.

На завершающей стадии действия рабочего органа оператор раскрывает захваты устройства, нагрузка на коросниматели и направляющие лезвия исчезает, пружины разжимаются, и все окорочные механизмы переводятся в начальное положение.

Результаты исследования и их обсуждение

Технический результат достигается тем, что новый способ обработки дерева, предусматривающий, как и в традиционном варианте функционирования харвестерной головки, раскряжевку ствола пильным механизмом и очистку от сучьев сучкорезными ножами, дает возможность пролыски лесоматериалов – снятия коры поваленного дерева полосами по всей длине – а также удаления

луба (частично или полностью). Это ускоряет естественную сушку древесины при ее хранении на складах.

В определенных ситуациях коросниматели могут работать на толщину, не предусматривающую удаление слоя луба, для предотвращения растрескивания древесины. Такая настройка короснимателей возможна при работе с пиловочником и лесоматериалами, идущими на щепу, стойки, кряжи, используемыми без антисептических пропиток в круглом виде.

Еще одним вариантом эффективного использования описанного рабочего органа может быть его применение при валке леса, когда предполагается дальнейший сплав полученного сырья. Харвестерная головка разработанной конструкции в данном случае значительно повышает плавучесть хвойных тонкомерных сортиментов.

Кроме того, следует учитывать заинтересованность потребителей лесной продукции в широком внедрении технологий, позволяющих производить окорку при обработке и переработке лесоматериалов на лесных складах предприятий. Процесс окорки приводит к скоплению значительного объема коры на складе и потребности в дальнейшей ее утилизации, представляющей трудную задачу для производства. Снижение объемов поступающей на склад коры, удаляемой с лесоматериалов уже на стадии обработки их в лесу, до доставки на лесопромышленное предприятие, дает возможность частичного решения данной проблемы. В этом случае поступление на склад заранее окоренных древесных материалов может способствовать повышению экономической эффективности производства. Внедрение предложенных варианта заготовки на лесосеке окоренных лесоматериалов и рабочего органа харвестеров (процессоров) для осуществления заготовки может увеличить долю отходов лесосечных работ на лесосеке.

Заключение

Конструкция новой харвестерной (процессорной) головки не предусматривает значительных финансовых затрат на ее модернизацию и позволяет осуществить пролыску лесоматериалов продольными полосами по всей длине выпиливаемых бревен без наличия дополнительного привода рабочих механизмов. Это дает возможность реализовать грубую окорку с минимальными финансовыми затратами уже на стадии реализации лесосечных работ и повысить эффективность деятельности лесозаготовительных и обрабатывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Будник П.В., Демчук А.В. Функционально-технологический анализ харвестерной головки // Наука и бизнес: пути развития. 2012. № 9(15). С. 36–38.
Budnik P.V., Demchuk A.V. Functional and Technological Analysis of Harvesting Head. *Science and Business: Development Ways*, 2012, no. 9(15), pp. 36–38. (In Russ.).
2. Демчук А.В. Модернизация технологического оборудования харвестера для повышения эффективности вывозки сортиментов // Инж. вестн. Дона. 2012. Т. 20, № 2. С. 542–546.
Demchuk A.V. The Technological Equipment Modernization for the Harvester on Purpose Efficiency of Removal Assortments. *Engineering Journal of Don*, 2012, vol. 20, no. 2, pp. 542–546. (In Russ.).

3. Мохирев А.П., Мамматов В.О., Уразаев А.П. Моделирование технологического процесса работы лесозаготовительных машин // Междунар. науч. исслед. 2015. № 3(24). С. 72–74.

Mokhirev A.P., Mammatov V.O., Urazaev A.P. Modeling of the Technological Process of Logging Machines. *Journal of International Scientific Researches*, 2015, no. 3(24), pp. 72–74. (In Russ.).

4. Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пилушина Г.А., Шевелева Е.В. Повышение работоспособности рабочих органов и трибосистем технологического оборудования харвестеров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 135–149.

Pamfilov E.A., Kapustin V.V., Pilyushina G.A., Sheveleva E.V. Improving the Performance of Working Bodies and Tribosystems of Harvester Technological Equipment. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 6, pp. 135–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-135-149>

5. Патент 117259 U1 РФ, МПК A01G 23/095(2006.01), B27L 1/00(2006.01). Рабочий орган валочно-сучкорезно-раскряжевной машины для выработки сортиментов: № 2012102528/13: заявл. 25.01.2012: опубл. 27.06.2012 / И.Р. Шегельман, О.Н. Галактионов, А.В. Демчук.

Shegelman I.R., Galaktionov O.N., Demchuk A.V. *The Working Body of the Feller-Delimiter-Crosscutter for the Production of Logs*. Patent RF no. RU 117 259 U1, 2012. (In Russ.).

6. Патент 2513415 C2 РФ, МПК A01G 23/083. Валочное устройство для валки и обрезки сучьев на стволах деревьев и лезвие для обрезки сучьев: № 2011134264/13: заявл. 15.01.2010: опубл. 20.04.2014 / Ю. Кескинен, К. Киннунен, К. Ханне.

Keskinen J., Kinnunen K., Khanne K. *Feller Device for Felling and Limbing on Tree Trunks and Blade for Limbing*. Patent RF no. RU 2 513 415 C2, 2014. (In Russ.).

7. Патент 2676139 C1 РФ, МПК A01G 23/095(2006.01), B27L 1/00(2006.01). Способ выработки окоренных сортиментов и рабочий орган для его осуществления: № 2017145977: заявл. 26.12.2017: опубл. 26.12.2018 / Е.М. Царев, С.Е. Анисимов, К.П. Рукомойников, Ю.А. Коновалова, С.В. Ведерников, В.М. Заболотский, Н.С. Анисимов, И.С. Анисимов.

Tsarev E.M., Anisimov S.E., Rukomojnikov K.P., Konovalova Yu.A., Vedernikov S.V., Zabolotskij V.M., Anisimov N.S., Anisimov I.S. *Method of Developing Barked Assortments and Working Body for Implementation Thereof*. Patent RF no. RU 2 676 1939 C1, 2018. (In Russ.).

8. Пилушина Г.А., Памфилов Е.А., Шевелева Е.В. Повышение износостойкости сучкорезных ножей многооперационных лесозаготовительных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 174–184.

Pilyushina G.A., Pamfilov E.A., Sheveleva E.V. Wear Resistance Improvement of Delimiting Knives of Multifunctional Logging Machines. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 6, pp. 174–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.174>

9. Пошарников Ф.В., Юдина Н.Ю., Буланов А.С., Леденцов П.С. Анализ состояния технического оснащения лесозаготовительной промышленности // Лесотехн. журн. 2012. № 2. С. 100–105.

Posharnikov F.V., Yudina N.Yu., Bulanov A.S., Ledentsov P.S. Analysis of the State of Technical Equipment of the Logging Industry. *Forest Engineering Journal*, 2012, no. 2, pp. 100–105. (In Russ.).

10. Рукомойников К.П., Ведерников С.В. Модернизация сучкорезного ножа харвестерной головки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 120–127.

Rukomoynikov K.P., Vedernikov S.V. Modernization of Harvester Head Delimiting Knife. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 1, pp. 120–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.120>

11. Alfthan A. *Feed Means and Log Processing Head*. Patent PL no. PL 3 202 253 T3, 2020.
12. Alfthan A., Palmroth L. *Log Processing Head*. Patent FI no. EP 3 391 737 B1, 2021.
13. Bisballe C. *Harvester Head Assembly*. Patent US no. 9,591,810 B2, 2017.
14. Eriksson J.A.L. *Device in an Apparatus for Processing Trees*. Patent US no. 4,194,542, 1980.
15. Kaye B.J. *Timber-Working Head and Method of Operation*. Patent US no. US 9,999,180 B2, 2018.
16. Moisio J. *Timber Harvester*. Patent US, no. 5,732,754, 1998.
17. Niemi P. *Delimiting Device and a Method in a Delimiting Device*. Patent US no. US 6,318,425 B1, 2001.
18. Peterson R.A. *Four Roller Tree Harvester Head*. Patent US no. US 9,232,701 B1, 2016.
19. Rukomojnikov K.P., Vedernikov S.V., Gabdrahmanov M.G. A Method for Delimiting Tree-Trunks and a Device for Applying the Method. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 263–266. <https://doi.org/10.5937/jacs16-16442>
20. Wildey A.J. *Tree Harvesting and Processing Head*. Patent US no. 5,785,101, 1998.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article


Научная статья

УДК 630*37;630*83

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-139-152

Применение комплексов лесозаготовительных машин в условиях Республики Башкортостан

А.Н. Заикин, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

В.В. Сиваков  канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [R-7264-2019](https://orcid.org/0000-0002-0175-9030),


ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Н.А. Булхов, канд. экон. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0373-374X>

С.А. Коньшакова, канд. экон. наук, доц.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3523-1488>

С.Г. Кузнецов, канд. экон. наук, доц.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4617-2732>

Брянский государственный инженерно-технологический университет, просп. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия, 241037; zaikin.anatolij@yandex.ru, sv@bgitu.ru , pismaanick@mail.ru, gler@bk.ru, pro-econom@bgitu.ru

Поступила в редакцию 18.01.21 / Одобрена после рецензирования 15.04.21 / Принята к печати 19.04.21

Аннотация. Распад комплексов из лесозаготовительных предприятий и леспромхозов, снижение внимания органов управления к выпуску специализированных машин и оборудования, производственному процессу лесозаготовок привели к ухудшению оснащенности лесозаготовительных предприятий специализированной техникой и эффективной организации ее работы. Появились мелкие частные лесозаготовительные предприятия, техническая база которых находится на низком уровне. Можно сказать, что произошел возврат к технологии 60-х гг. прошлого века. При валке, обрезке сучьев и раскряжке применяются бензопилы зарубежного производства. Для трелевки используются тракторы общего назначения типа МТЗ-80(82) с простейшим технологическим оборудованием – комплектом чокеров. На отдельных более крупных предприятиях есть зарубежные харвестеры и форвардеры. В таком же положении находятся и лесхозы Республики Башкортостан. С целью повышения оснащенности техникой и совершенствования организации ее работы на предприятиях Республики Башкортостан нами рассмотрен и предлагается к применению ряд комплектов машин. Приобрести современные машины, оборудование и оснастить ими производство недостаточно. Необходима организация производственного процесса, обеспечивающая эффективную работу этих машин. Лесосечные работы как сложный многооперационный дискретный технологический процесс могут выполняться с применением различных технологий. Наибольшее распространение в настоящее время получила технология заготовки и вывозки сортиментов с использованием нескольких видов лесозаготовительных машин и оборудования. Для эффективной работы лесозаготовительные машины, выполняющие отдельные операции, объединяются в комплекты машин. Однако на практике невозможно подобрать машины и оборудование с одинаковой или незначительно отличающейся производительностью. Объем выработки таких комплектов, как правило, равен объему выработки на операции с наименьшей производительностью или даже оказывается ниже него. С целью повышения объема выработки комплекта машин до объема выработки ведущей машины (машины с наибольшей производительностью) необходимо рассчитать режимы работы машин для конкретных условий эксплуатации. Предложены 5 комплектов лесозаготовительных машин. Рассчи-

таны затраты, которых потребует использование каждого из них. На основе полученных числовых данных сделан вывод о том, что в условиях Республики Башкортостан наиболее экономически целесообразно применение следующего комплекта: бензопила для валки, чокерный трактор для трелевки, две бензопилы для обрезки сучьев и раскряжевки, лесовоз для вывозки.

Ключевые слова: лесосечные работы, комплекты лесозаготовительных машин, лесозаготовки, харвестер, форвардер, организация работы машин, производительность комплекта машин, Башкортостан

Для цитирования: Заикин А.Н., Сиваков В.В., Булхов Н.А., Коньшакова С.А., Кузнецов С.Г. Применение комплексов лесозаготовительных машин в условиях Республики Башкортостан // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 139–152. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-139-152>

Original article

The Use of Logging Machinery Sets in the Republic of Bashkortostan

Anatoliy N. Zaikin, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1831-6893>

Vladimir V. Sivakov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [R-7264-2019](https://orcid.org/0000-0002-0175-9030), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0175-9030>

Nikolay A. Bulkhov, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0373-374X>

Svetlana A. Konshakova, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3523-1488>

Sergey G. Kuznetsov, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4617-2732>

Bryansk State Engineering and Technology University, prosp. Stanke Dimitrova, 3, Bryansk, 241037, Russian Federation; zaikin.anatolij@yandex.ru, sv@bgitu.ru[✉], pismaanick@mail.ru, gler@bk.ru, pro-econom@bgitu.ru

Received on January 18, 2021 / Approved after reviewing on April 15, 2021 / Accepted on April 19, 2021

Abstract. The disintegration of the integrated logging enterprises, as well as of the forestry enterprises and the reduced attention of the authorities to the production of specialized machinery and equipment, the logging production process, have led to a decline in the equipment of the logging enterprises with specialized machinery and the effective organization of their operation. Small, privately owned, poorly equipped with machinery logging companies have emerged. Practically we reverted to the technology of the 1960s. Foreign chainsaws are used for felling, delimiting and crosscutting. The skidding operation practically uses general-purpose tractors of MT3-80(82) type with the simplest technological equipment – a set of chokers. Some of the larger companies use foreign harvesters and forwarders. According to our research, forestry farms of the Republic of Bashkortostan are in a similar position. In order to increase the level of equipment and improve the organization of its work at the enterprises of the Republic of Bashkortostan we have considered and proposed for use a number of machinery sets. However, practice shows that it is not enough to acquire and equip the production with modern machinery and equipment. A production process must be set up to ensure the effective operation of these machines. Logging as a complex, multi-operated, discrete process



can be carried out using a variety of technologies. The most common technology nowadays is the logging and hauling of assortments, for which various harvesting machines and equipment can be used. For the effective operation, harvesting machines performing individual operations are combined into machinery sets. However, current practice shows that it is not possible to match machines and equipment with the same or slightly different capacities. Therefore, the output of such sets is usually equal to, or even lower than, the output of the operation with the lowest capacity. In order to increase the output of the machinery set to the output of the leading machine (the machine with the highest capacity), it is necessary to calculate the modes of operation of machines for specific operating conditions. There are five sets of logging machines offered. The costs that the use of each of them will require are calculated. On the basis of the obtained data it is concluded that in the conditions of the Republic of Bashkortostan it is most economically feasible to use the following set: chainsaw for felling, choker tractor for skidding, two chainsaws for delimiting and crosscutting, lumber carrier for hauling.

Keywords: logging operations, logging machinery sets, harvesting, harvester, forwarder, organization of machine operation, machine set performance

For citation: Zaikin A.N., Sivakov V.V., Bulkhov N.A., Konshakova S.A., Kuznetsov S.G. The Use of Logging Machinery Sets in the Republic of Bashkortostan. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 139–152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-139-152>

Введение

Леса занимают 39,8 % территории Республики Башкортостан, запас древесины достигает 760,3 млн м³, установленный объем ее ежегодной заготовки составляет 9156 тыс. м³ [11]. Все это определяет высокую значимость лесного сектора для экономики региона, его инвестиционную привлекательность.

Однако техническое оснащение лесозаготовительных предприятий республики находится на низком уровне. Для валки применяются в основном бензопилы фирм Stihl или Husqvarna. Для трелевки в отдельных лесхозах используются трелевочные тракторы типа ТДТ-55 [7], практически в 100 % лесхозов – трактор общего назначения типа МТЗ-80(82) с простейшим технологическим оборудованием – комплектом чокеров. Этими же тракторами, оборудованными вилочными погрузчиками, осуществляется уплотнение штабеля сортиментов. Вывозка сортиментов с лесосеки выполняется или имеющимися в лесхозах сортиментовозами, оборудованными гидроманипуляторами, или машинами, принадлежащими сторонним организациям или частным лицам.

Техника лесхозов в основном выработала свой ресурс [7]. Дальнейшее ее применение в соответствии с имеющимися схемами работы экономически нецелесообразно. В данной статье рассмотрены возможные варианты формирования и использования комплектов лесозаготовительных машин в условиях Республики Башкортостан, рассчитаны сопряженные с этим затраты.

Объекты и методы исследования

Лесосечные работы представляют собой сложный многооперационный дискретный технологический процесс [24]. Лесозаготовительные машины, выполняющие отдельные операции, объединяются в комплекты машин. Однако,

как показывает существующая практика, не удастся подобрать машины и механизмы в комплекте так, чтобы их производительность была одинакова или отличалась незначительно. Зачастую, если на 1-й операции работает одна машина комплекта, то на 2-й – две-три, а на 3-й – одна-две и т. д. Объем выработки на операциях при этом все равно остается разным. Особенность лесосечных работ заключается в том, что каждый раз между выполняемыми операциями создаются технически и технологически перемещаемые запасы древесины [2–6, 9, 17] – все операции в технологическом процессе, за исключением погрузки и вывозки, связаны ими между собой [14, 15, 18, 27]. Несбалансированность объемов выработки приводит к простоям наиболее производительных (головных) машин и снижению общего объема их выработки до минимального на одной из основных операций, т. е.

$$Q = \min \{Q\} = Q_{\min}.$$

Требуется так организовать процесс, чтобы общий объем выработки всего комплекта машин был равен или близок максимальному объему выработки головной машины на основной операции, т. е.

$$Q = \max \{Q\} = Q_{\max}.$$

Данное условие может быть реализовано при поддержании на требуемом уровне необходимых в конкретных производственных условиях объемов оперативных запасов путем маневрирования численностью и/или сменностью работы машин на отстающих операциях. То есть на операциях с объемом выработки меньше Q_{\max} следует на определенное, рассчитанное для конкретных условий время подключать дополнительную машину или на это время увеличивать сменность работы на данной операции одной или нескольких основных машин. Для такой организации производственного процесса сначала следует установить, на каких операциях нужно маневрирование численностью или сменностью работы машин по условию:

$$Q_i - Q_s \begin{cases} < 0 - \text{требуется маневрирование на } i\text{-й операции;} \\ = 0 - \text{маневрирование не требуется;} \\ > 0 - \text{требуется маневрирование на } s\text{-й операции,} \end{cases}$$

где Q_i – объем пополнения запаса машинами i -й операции, $Q_i = \Pi_i n_i k_i$; Q_s – объем выработки запаса машинами s -й операции, $Q_s = \Pi_s n_s k_s$; Π_i и Π_s – производительность машин на i -й и s -й операциях; n_i и n_s – число машин на i -й и s -й операциях; k_i и k_s – число смен работы машин на i -й и s -й операциях; i – любое целое число ($i = 1, 2, 3, \dots, l$), $s = i + 1$.

Для операций, на которых требуется маневрирование численностью (сменностью работы) машин, определяется продолжительность их работы в планируемый период времени. Контроль за соответствием режимов работы машин и оборудования на отдельных операциях удобно вести по объемам межоперационных запасов (z , м³), рассчитанным для этих же условий.

Например, для расчета режимов работы машин нами разработаны математические модели [2–4]. Они отличаются от существующих [8, 9] тем, что позволяют определять не только объемы запасов, но и режимы работы комплекта машин, выполняющего две и более операции, с учетом его максимальной выработки и маневрирования (в сторону увеличения) численностью

или сменностью работы машин на операциях с меньшей выработкой, чем у ведущей машины (рис. 1 и 2).

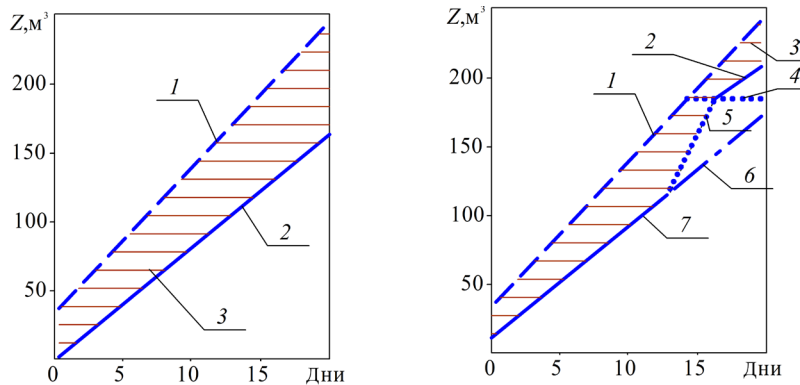


Рис. 1. Характер изменения объемов валки (1), трелевки (2) и запасов между ними (3) при остановке валочно-пакетирующей машины (4), при подключении (5) и до подключения (6) дополнительной трелевочной машины

Fig. 1. Pattern of change in felling volumes (1), skidding volumes (2) and stockpile volumes between them (3), when the feller-buncher is stopped (4), when the additional skidder is connected (5), before the additional skidder is connected (6)

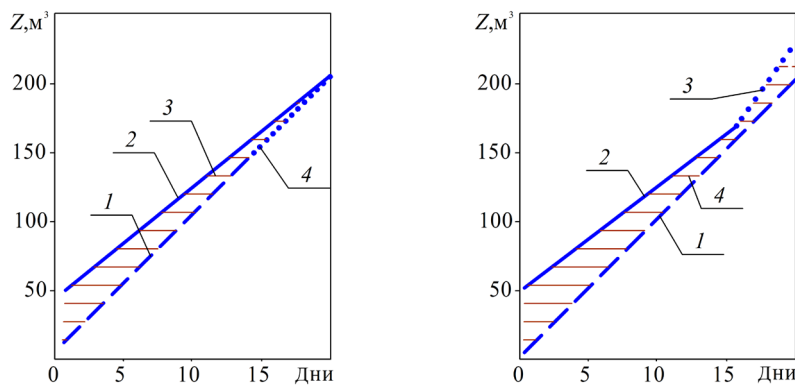


Рис. 2. Характер изменения объемов обрезки сучьев (1), трелевки до (2) / после (3) подключения дополнительной трелевочной машины и объемов запасов между ними (4)

Fig. 2. Pattern of change in delimiting (1), skidding before (2) and after (3) connection of additional skidder and stocking volumes between them (4)

Из рис. 1, 2 видно, что увеличение числа техники на отстающих операциях обеспечивает бесперебойную работу машин и выработку комплекта, равную выработке ведущей машины.

Проведенные нами исследования [7] и экономические расчеты показали, что в качестве дополнительного комплекта машин целесообразно применять при валке и обрезке сучьев бензиномоторную пилу, при трелевке – чокерный трелевочный трактор.

Для повышения эффективности производственного процесса лесозаготовок, получения лесхозами Республики Башкортостан древесины в требуемом перерабатывающим предприятиям региона (например, ООО «Кроношпан-Башкортостан») объеме следует рассмотреть несколько применимых в данных условиях вариантов обеспечения лесхозов техникой. При этом виды, типы и марки приобретаемых машин могут быть различными, так как рельеф местности, почвенно-грунтовые условия, средние запасы древостоя, запасы на 1 га и т. д. у разных лесхозов неодинаковы. Кроме того, эффективность работы как лесозаготовительных предприятий, так и лесной отрасли в целом во многом определяется существующей дорожной сетью и возможностями ее совершенствования [19–26].

В связи с тем, что в основном лесонасаждения лесхозов республики составлены лиственными породами (осина, береза, липа) и объем хлыста не превышает $0,4 \text{ м}^3$, рекомендуются следующие машины и оборудование: для валки – профессиональные средние бензопилы, например фирмы Stihl, валочно-пакетирующие машины типа ЛП-119 с накопителем или харвестеры; для трелевки – колесные тракторы типа МТЗ-82.1 с трелевочным приспособлением, чокерные тракторы «Онежец-350» и колесные или гусеничные форвардеры; для обрезки сучьев и раскряжевки – самоходные или навесные сучкорезно-раскряжевочные машины и профессиональные легкие бензопилы; для погрузки – трактор МЗ-82.1 с клещевым захватом; для погрузки и вывозки – сортиментовозы с манипулятором или без него.

Для указанного оборудования применимы, с учетом несущей способности грунтов как в Республике Башкортостан, так и в других регионах РФ, следующие схемы организации лесозаготовок комплектами машин (рис. 3): 1, 2 – для сухих лесосек; 3–5 – для лесосек с низкой несущей способностью грунтов [1, 10, 12–14, 16].

1-й вариант: при валке работает одна бензопила производительностью около 74 м^3 , при трелевке – один чокерный трактор производительностью $50\text{--}60 \text{ м}^3$ (в зависимости от условий эксплуатации), при обрезке сучьев и раскряжевке – две бензопилы производительностью до 30 м^3 каждая, при вывозке – один лесовоз, объем его выработки за смену составляет до 50 м^3 (из расчета сменного объема выработки – 50 м^3 , числа рабочих дней в месяце – 20 и числа месяцев – 11).

2-й вариант: то же оборудование, что и для 1-го варианта, но с заменой на вывозке чокерного трактора на бесчокерный (МТЗ-82.1) и лесовоза с гидроманипулятором на челюстной погрузчик (МТЗ-82.1) и безманипуляторный сортиментовоз.

3-й вариант: сменный объем выработки валочно-пакетирующей машиной (например, ЛП-119) – 200 м^3 , в комплекте при трелевке как минимум с двумя подборщиками пачек (например, ЛТ-187), двумя сучкорезно-раскряжевочными машинами или харвестером при обрезке сучьев и раскряжевке и для вывозки два лесовоза при двухсменном режиме работы с объемом выработки около 180 м^3 .

4-й вариант: сменный объем выработки харвестера (например, ЛП-19Б3) – 200 м^3 , в комплекте при трелевке с двумя форвардерами (например, «Онежец-350») и при вывозке с двумя лесовозами, оснащенными гидроманипулятором, при двухсменной работе с объемом выработки около 180 м^3 .

Комп-лект	Валка	Трелевка	Обрезка сучьев, раскряжевка	Погрузка	Вывозка
1	 1 шт.	 1 шт.	 2 шт.		1 см 1 шт.
	Бензопила 25 000 р	Трактор 1 940 000 р	Бензопила 19 000 р	Сортиментовоз с гидроманипулятором 5 500 000 р	
2	 1 шт.	 1 шт.	 2 шт.	 1 шт.	 1 шт. 1 см
	Бензопила 25 000 р	Трактор 1 215 000 р	Бензопила 19 000 р	Трактор 1 084 000 р	Сортиментовоз 3 500 000 р
3	 1 шт.	 2 шт.	 2 шт.		2 см 2 шт.
	Валочно-пакетирующая машина 8 168 000 р	Трактор 4 850 000 р	Сучкорезно-раскряжевная машина 5 050 000 р	Сортиментовоз с гидроманипулятором 5 500 000 р	
4	 1 шт.	 2 шт.			2 см 2 шт.
	Харвестер 8 168 000 р	Форвардер 6 000 000 р		Сортиментовоз с гидроманипулятором 5 500 000 р	
5	 1 шт.	 2 шт.	 1 шт.		1 см 1 шт.
	Бензопила 25 000 р	Бензопила 19 000 р	Форвардер 6 000 000 р	Сортиментовоз с гидроманипулятором 5 500 000 р	

Рис. 3. Возможные варианты комплектов машин и оборудования

Fig. 3. Possible options for sets of machinery and equipment

5-й вариант: на валке будет работать одна, а на обрезке сучьев и раскряжевке – две бензопилы, на трелевке – один форвардер и на вывозке – один лесовоз при сменном объеме выработки 50 м³.

Результаты исследования и их обсуждение

С целью экономической оценки предложенных вариантов комплектов машин нами был выполнен расчет капитальных затрат и удельных годовых капитальных затрат по каждому варианту.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Капитальные и удельные годовые капитальные затраты по вариантам схем организации лесозаготовок (комплектов машин)

Table 1

Capital costs and specific annual capital costs by logging scheme options (machinery sets)

Комплект	Капитальные затраты, р	Удельные годовые капитальные затраты, р/м ³
1	7 503 000	682
2	5 862 000	533
3	38 968 000	885
4	31 168 000	708
5	11 563 000	1051

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что наиболее эффективным по капиталовложениям будет комплект машин номер 2. Удельные годовые капитальные затраты при его использовании составят 533 р/м³.

Далее рассчитаем для каждого предложенного варианта эксплуатационные затраты, которые включают в себя годовую заработную плату основных рабочих (основную и дополнительную с начислениями) и затраты на содержание машин за год. Расчет заработной платы проводился по стандартной методике, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Заработная плата рабочих

Table 2

Wages of workers

Специальность	Ставка, р/ч	Заработная плата		Отчисления во внебюджетные фонды, р.
		средняя за месяц (5-дневная рабочая неделя), р	за год (247 рабочих дней), р	
Вальщик леса	200	32 933	395 200	126 464
Трелевщик	180	29 640	355 680	113 817
Водитель сортиментовоза	210	34 580	414 960	132 787
Машинист валочно-пакетирующей машины	210	34 580	414 960	132 787
Машинист трелевочного трактора	180	29 640	355 680	113 818
Машинист форвардера	290	47 753	573 040	183 373
Вспомогательный рабочий	120	19 750	237 120	75 878

Результаты расчета стоимости горюче-смазочных материалов для машин и оборудования приведены в табл. 3, сменной оснастки для каждой машины – в табл. 4.

Таблица 3

Расчет стоимости горюче-смазочных материалов

Table 3

Cost of fuel and lubricants

Тип машины	Номинальная мощность двигателя, кВт	Удельный расход топлива, г/кВт·ч	Расход топлива		Стоимость топлива, р	Расходы на ГСМ	
			л/ч	л/смена		средние за месяц, р	за год, р
Бензопила для валки Stihl MS 260	2,4	–	2,9	23	42	20 056	240 676
Бензопила для обрезки сучьев Stihl MS 230	1,9	–	2,5	20	42	17 290	207 480
Трактор трелевочный	95,6	233	22,5	180	45	165 798	1 989 585
Сортиментовоз с гидроманипулятором	220,0	200	44,4	355	45	328 652	3 943 824
Трактор МТЗ-82.1	59,6	226	13,6	109	45	100 609	1 207 311
Сортиментовоз КАМАЗ 6520	190,0	200	38,3	307	45	283 831	3 405 969
Валочно-пакетирующая машина	95,5	210	20,2	162	45	149 793	1 797 518
Форвардер «Онежец-350»	88,2	227	20,2	162	45	149 543	1 794 517
Трактор гусеничный	95,5	210	20,2	161,72	45	149 793	1 797 518
Сучкорезно-раскряжевая машина	95,5	210	20,2	162	45	149 793	1 797 517

Таблица 4

Расчет стоимости оснастки

Table 4

Cost of equipment

Тип машины	Шины		Стоимость шин, р		Затраты на сменную оснастку, р/год
	передние	задние	передние	задние	
Трактор	360/70R24	18.4R34	15 650	47 340	25 196
Сортиментовоз с гидроманипулятором	425/85 R21	425/85 R21	25 750	25 750	30 900
Трактор МТЗ-82.1	11.2 R20	15.5 R38	6 000	16 800	9 120
Сортиментовоз	425/85 R21	425/85 R21	25 750	25 750	30 900

Результаты расчетов эксплуатационных расходов отражены в табл. 5, удельных эксплуатационных расходов – в табл. 6, удельных приведенных затрат – в табл. 7.

Таблица 5

Расчет годовых эксплуатационных расходов

Table 5

Annual operating costs

Комплект	Заработная плата рабочих, р	Стоимость ГСМ, р	Амортизационные отчисления, р	Затраты на ТР и ТО, р	Прочие расходы, р	Затраты на сменную оснастку, р	Полные эксплуатационные затраты, р
1	2 107 206	5 513 336	1 488 200	351 903	210 720	56 096	9 727 462
2	2 261 334	6 476 228	1 116 000	377 642	226 133	49 140	10 166 479
3	6 310 948	20 460 047	6 693 600	1 053 928	631 094	123 600	35 273 219
4	4 093 544	19 444 581	6 233 600	683 621	409 354	123 600	30 988 301
5	2 396 888	5 535 374	2 300 200	400 280	239 688	30 900	10 903 331

Примечание: ТР – текущий ремонт, ТО – техническое обслуживание.

Таблица 6

Расчет удельных эксплуатационных расходов

Table 6

Specific operating costs

Комплект	Полные эксплуатационные затраты, р/год	Производительность, м ³ /мес. (20 рабочих дн.)	Производительность, м ³ /год	Удельные эксплуатационные затраты, р/м ³
1	9 727 462	1483	16 320	596
2	10 166 479	1483	16 320	623
3	35 273 219	5236	57 600	612
4	30 988 301	2487	27 360	1132
5	10 903 331	1483	16 320	668

Таблица 7

Расчет удельных приведенных затрат

Table 7

Specific overhead costs

Комплект	Удельные эксплуатационные затраты, р/м ³	Удельные капитальные затраты, р/м ³	Нормативный коэффициент эффективности капитальных затрат	Удельные приведенные затраты, р/м ³
1	596	682	0,15	698
2	623	533	0,15	702
3	612	885	0,15	745
4	1132	708	0,15	1239
5	668	1051	0,15	825

Из расчетов следует, что наиболее экономически эффективным является 1-й комплект машин.

Заключение

Анализ годовых эксплуатационных и удельных эксплуатационных расходов, а также приведенных затрат показывает, что наиболее низкие годовые и удельные эксплуатационные затраты в условиях Республики Башкортостан и сходных с ней по природно-климатическим показателям регионах будет иметь 1-й комплект машин из бензопилы для валки, чокерного трактора для трелевки, двух бензопил для обрезки сучьев и раскряжевки, лесовоза для вывозки. У этого же комплекта наиболее низкие приведенные затраты. Получается, что экономически целесообразно внедрение 1-го комплекта машин, так как данный состав комплекта потребует наименьших капитальных затрат.

Расчет экономических параметров по каждому комплекту выполнен с учетом минимального объема выработки машин. С целью получения максимального объема выработки комплекта машин необходимо варьирование численности или сменность работы машин на отстающих операциях, что требует проведения дополнительных исследований для конкретных условий эксплуатации.

В связи с тем, что эксплуатация лесозаготовительных машин в условиях Республики Башкортостан имеет свою специфику, потребуются выполнение определенного объема работ для планирования норм выработки на отдельных видах лесозаготовительных операций. Только имея нормы выработки лесозаготовительных машин для конкретных условий эксплуатации, можно рассчитать достоверные режимы работы машин и на основе этих данных получить алгоритм организации работы различных комплектов машин. Изучив опыт организации использования лесозаготовительных машин и оборудования в пилотных лесхозах, следует принимать решение о возможности его распространения на другие площадки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Денисов С.А., Торопов А.С., Микрюкова Е.В., Волкова Л.П., Шарпов Е.С., Тетерина М.А., Ефимов Ю.В., Мартынов А.М., Романов Э.Г. Обоснование ресурсосберегающих технологий лесопромышленного комплекса, адаптированных к природным условиям Пермского края, с минимизацией затрат на лесовосстановление: отчет о НИР/ НИОКР (заключительный) / ГОУ ВПО Марийский государственный технический университет; рук. С.Б. Якимович. Грант № 6.6-29/2 от 03.08.2007. Государственная регистрация № 2007-01.29. Йошкар-Ола, 2007. 500 с.

Denisov S.A., Toropov A.S., Mikryukova E.V., Volkova L.P., Sharapov E.S., Teterina M.A., Efimov Yu.V., Martynov A.M., Romanov E.G. *Justification of Resource-Saving Technologies of the Timber Industry, Adapted to the Natural Conditions of Perm Krai, with Cost Minimization for Reforestation: Research/Research and Development Report (Final)*. Mari State Technical University. Supervisor S.B. Yakimovich. Grant No. 6.6-29/2 Dated August 3, 2007. State registration No. 2007-01.29. Yoshkar-Ola, Publ., 2007. 500 p.

2. Заикин А.Н. Моделирование режимов работы лесосечных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 1. С. 71–77.

Zaikin A.N. Simulation of Logging Machines Operation Modes. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2009, no. 1, pp. 71–77. <http://lesnozhurnal.ru/upload/iblock/27d/27d123e35cbb74f7f17b1974f6f195da.pdf>

3. Заикин А.Н. Математическое моделирование режимов работы лесосечных машин и анализ изменения объемов оперативных запасов // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2010. № 1. С. 69–76.

Zaikin A.N. Designing of Operation Modes of Logging Machines. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2010, no. 1, pp. 69–76.

4. Заикин А.Н. Математические модели расчета режимов работы лесосечных машин // В мире научных открытий. 2010. № 4-13(10). С. 126–130.

Zaikin A.N. Mathematical Models for Calculating the Operating Modes of Logging Machines. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2010, no. 4-13(10), pp. 126–130.

5. Заикин А.Н. Типы и назначение запасов древесины в производственном процессе лесозаготовок // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 3. С. 71–78.

Zaikin A.N. The Types and Purpose of Timber Stocks in the Process of Timber Production. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2013, no. 3, pp. 71–78. <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/d4f/le2.pdf>

6. Заикин А.Н., Рыжикова Е.Г., Теремкова И.И. Метод оперативного планирования и управления лесосечными работами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 2. С. 107–118.

Zaikin A.N., Ryzhikova E.G., Teremkova I.I. Method of Operational Planning and Control of Logging Operations. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2017, no. 2, pp. 107–118. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.2.107>

7. Заикин А.Н., Коньшакова С.А., Сиваков В.В., Кузнецов С.Г., Булхов Н.А. Технологический ресурс лесозаготовительной техники лесхозов Республики Башкортостан // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 123–133.

Zaikin A.N., Konshakova S.A., Sivakov V.V., Kuznetsov S.G., Bulkhov N.A. Technological Resources of Harvesting and Logging Machinery of Bashkortostan Forestries. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 4, pp. 123–133. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-123-133>

8. Климушев Н.К. Методы и модели управления запасами лесоматериалов: моногр. Ухта: УГТУ, 2001. 76 с.

Klimushev N.K. *Methods and Models of Timber Stock Management*: Monograph. Ukhta, USTU Publ., 2001. 76 p.

9. Климушев Н.К. Управление запасами лесоматериалов: моногр. М.: МГУЛ, 2005. 187 с.

Klimushev N.K. *Management of Timber Stocks*: Monograph. Moscow, MGUL Publ., 2005. 187 p.

10. Ле Ан Туан, Смирнова А.И. Экономические подходы к обоснованию технологий лесозаготовок в лесопромышленном холдинге // Изв. вузов. Лесн. журн. 2001. № 5–6. С. 170–174.

Le An Tuan, Smirnova A.I. Economic Approaches to Harvesting Technologies Substantiation in Forest Industrial Holding Company. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2001, no. 5-6, pp. 170–174. <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/e24/e24ee1b43b9cd-52e8c6d87c1e855e3f0.pdf>

11. Лесной план Республики Башкортостан. Кн. 1. Пояснительная записка: утв. Указом Главы Республики Башкортостан от 27.12.18 № УГ-76С. Уфа, 2018. 337 с.

Forest Plan of the Republic of Bashkortostan. Book 1. Explanatory Note: Approved by the Decree of the Head of the Republic of Bashkortostan Dated December 27, 2018, No. УГ-76С. Ufa, 2018. 337 p.

12. Мохирев А.П., Горяева Е.В., Медведев С.О. Оценка технологических процессов лесозаготовительных предприятий // Лесотехн. журн. 2016. Т. 6, № 4(24). С. 139–147.

Mokhiev A.P., Goryaeva E.V., Medvedev S.O. Estimation of Technological Processes of Logging Enterprises. *Forestry Engineering Journal*, 2016, vol. 6, no. 4(24), pp. 139–147. <https://doi.org/10.12737/23448>

13. Рукотойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 94–107.

Rukotojnikov K.P., Mokhiev A.P. Validation of the Logging Operations Scheme through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 4, pp. 94–107. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.94>

14. Шегельман И.Р., Скряпник В.И., Кузнецов А.В. Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях // Уч. зап. ПетрГУ. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2010. № 4(109). С. 66–75.

Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Kuznecov A.V. Harvesting Machines Performance Analysis and Evaluation of Their Effectiveness in Various Working Environments. *Proceedings of Petrozavodsk State University. Series: Natural & Engineering Sciences*, 2010, no. 4(109), pp. 66–75.

15. Шегельман И.Р., Щеголева Л.В., Пономарев А.Ю. Математическая модель выбора сквозных потоков заготовки, транспортировки и переработки древесного сырья // Изв. СПбЛТА. 2005. № 172. С. 32–37.

Shegelman I.R., Shchegoleva L.V., Ponomarev A.Yu. Mathematical Model of the Choice of Through Flows of Procurement, Transportation and Processing of Wood Raw Materials. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2005, no. 172, pp. 32–37.

16. Якимович С.Б., Володина И.Ю. Формирование комплектов машин лесозаготовок на основе распределения состояний предмета труда по маршруту технологического процесса // Лесн. вестн. 2001. № 2. С. 128–136.

Yakimovich S.B., Volodin I.Yu. Formation of Sets of Logging Machines Based on the State Distribution of the Subject of Labor along the Technological Process Route. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2001, no. 2, pp. 128–136.

17. Якимович С.Б., Тетерина М.А. Классификация обрабатывающих транспортных систем заготовки и первичной обработки древесины // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2009. № 2. С. 67–73.

Yakimovich S.B., Teterina M.A. Classification of Wood Harvesting and Primary Processing Processing-Transporting Systems. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2009, no. 2, pp. 67–73.

18. Carlsson D., D'Amours S., Martel A., Rönnqvist M. Decisions and Methodology for Planning the Wood Fiber Flow in the Forest Supply Chain. *Recent Developments in Supply Chain Management*. Ed by R. Koster, W. Delfmann. Helsinki, University Press, 2008, pp. 11–39.

19. Henningson M., Karlsson J., Rönnqvist M. Optimization Models for Forest Road Upgrade Planning. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 2007, vol. 6, iss. 1, pp. 3–23. <https://doi.org/10.1007/s10852-006-9047-0>

20. Luce Ch.H. Effectiveness of Road Ripping in Restoring Infiltration Capacity of Forest Roads. *Restoration Ecology*, 1997, vol. 5, iss. 3, pp. 265–270. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.09731.x>

21. Medvedev S., Mokhiev A., Rjabova T. Methodical Approach to Increase Efficiency of Use of Wood Resource Potential of the Region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 316, art. 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012036>

22. Mokhiev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the Optimal Route of Wood Transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 226, art. 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012053>
23. Pentek T., Nevečerel H., Ecimović T., Lepoglavec K., Papa I., Tomašić Z. Strategijsko planiranje šumskih prometnica u Republici Hrvatskoj – raščlamba postojećega stanja kao podloga za buduće aktivnosti. *Nova Mehanizacija Šumarstva*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 63–78. (In Croat.).
24. Rukomojnikov K.P. Structuring of Loading Points and Main Skid Road in Conditions of Existing Road Network in Forest Compartment. *Journal of Applied Engineering Science*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 167–174. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes13-8866>
25. Trømborg E., Sjølie H., Solberg B., Hovi I.B., Madslie A., Veisten K. Economic and Environmental Impacts of Transport Cost Changes on Timber and Forest Product Markets in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 24, iss. 4, pp. 354–366. <https://doi.org/10.1080/02827580903035994>
26. Zaikin A.N., Mukovnina M.V., Nikitin V.V., Scherbakov E.N. Reducing Industrial Impact on Forest Ecosystems by Improving the Organization of Harvesting Operations. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 2018, vol. 11(60), no. 1, pp. 69–76.
27. Zyryanov M., Medvedev S., Mokhiev A. Study of the Possibility of Using Logging Residue for the Production of Wood Processing Enterprises. *Journal of Applied Engineering Science*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 15–18. <https://doi.org/10.5937/jaes18-22611>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 674-419:676.266.4:665.939.56

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-153-166

**Измельченные бумажно-смоляные пленки
как реакционно-способные наполнители
карбамидоформальдегидных смол**

Д.В. Иванов¹, канд. техн. наук, ст. преподаватель;

ResearcherID: [ABF-7853-2020](https://orcid.org/0000-0002-0001-2461), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0001-2461>

К.Э. Бака², инж.-лаборант; ResearcherID: [AAN-1221-2021](https://orcid.org/0000-0002-4826-7666),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4826-7666>

Д.А. Конарейкина¹, специалист по уч.-метод. работе;

ResearcherID: [ABF-7854-2020](https://orcid.org/0000-0003-3108-3016), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3108-3016>


¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; ivanov.d.v.spb@74.ru, dashakonareikina2012@yandex.ru

²ОАО «Фанпласт», ул. Днепропетровская, д. 8, Санкт-Петербург, Россия, 191119; ksenyabaca@gmail.com

Поступила в редакцию 29.04.21 / Одобрена после рецензирования 01.08.21 / Принята к печати 03.08.21

Аннотация. Измельченные в порошок бумажно-смоляные пленки, состоящие из пропиточной меламинокарбамидоформальдегидной смолы и белой целлюлозы, представляются перспективными наполнителями фанерных клеев, позволяющими увеличить вязкость клеевой композиции и обеспечить химическое взаимодействие с компонентами карбамидоформальдегидных смол. Установлено, что условная вязкость клея при введении в карбамидоформальдегидную смолу 4...6 % бумажно-смоляных пленок повышается на 80...110 %, однако рост вязкости сопровождается увеличением продолжительности желатинизации клея на 25...35 %. Реакционную способность пленок, обусловленную возможностью совместной поликонденсации карбамидо- и меламинокарбамидоформальдегидных олигомеров, изучали путем определения остаточных гидроксиметильных групп в отвержденных клеевых композициях. Согласно полученным результатам, при введении в смолу бумажно-смоляных пленок, содержание непрореагировавших гидроксиметильных групп увеличивается с 1,0 % в композиции без наполнителя до 2,5 % в композиции с 10 % пленок. Выявили, что содержание непрореагировавших гидроксиметильных групп в отвержденном клее на 90 % зависит от продолжительности желатинизации клеевой композиции. Для ускорения отверждения клея заменили хлорид аммония на более эффективный отвердитель МО-4СБ, позволяющий при массовой доле 4...5 % сократить продолжительность желатинизации на 15 %. Содержание гидроксиметильных групп в отвержденном клее с 4 % бумажно-смоляных пленок и 4...5 % МО-4СБ составило 0,6...0,7 %, что на 30...40 % меньше, чем в смоле без наполнителей. Образцы 3-слойной фанеры из композиции, содержащей 4 % наполнителя и 4 % модификатора-отвердителя МО-4СБ, имели прочность клеевого шва при ска-

© Иванов Д.В., Бака К.Э., Конарейкина Д.А., 2022

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

лывании на 15 % выше по сравнению контролем, изготовленным по традиционной рецептуре из клея, содержащего 8 % каолина и 1 % хлорида аммония. Прирост прочности позволил сократить норму расхода клея на 15 % с сохранением физико-механических показателей на уровне требований ГОСТ 3916.1–2018. Таким образом, использование 4 % бумажно-смоляных пленок в качестве наполнителя клея из карбаминоформальдегидной смолы повышает вязкость клеевой композиции до уровня существующих минеральных наполнителей, а также увеличивает прочность и водостойкость отвержденного полимера. Рост физико-механических показателей обеспечивается за счет сополиконденсации карбамино- и меламинакарбаминоформальдегидных олигомеров. Однако для приемлемой скорости реакции требуется использовать более эффективные отвердители, чем хлорид аммония.

Ключевые слова: бумажно-смоляные пленки, карбаминоформальдегидная смола, меламинаформальдегидная смола, гидроксиметильные группы, наполнители, модификатор-отвердитель, древесностружечные плиты, фанера

Для цитирования: Иванов Д.В., Бака К.Э., Конарейкина Д.А. Измельченные бумажно-смоляные пленки как реакционно-способные наполнители карбаминоформальдегидных смол // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 153–166. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-153-166>

Original article

Powdered Paper-Resin Films as Reactive Fillers for Urea-Formaldehyde Resins

Daniil V. Ivanov¹✉, Candidate of Engineering, Senior Lecturer;

ResearcherID: [ABF-7853-2020](https://orcid.org/0000-0002-0001-2461), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0001-2461>

Ksenya E. Baka², Laboratory Engineer; ResearcherID: [AAN-1221-2021](https://orcid.org/0000-0002-4826-7666),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4826-7666>

Daria A. Konareikina¹, Specialist in Educational and Methodological Work;

ResearcherID: [ABF-7854-2020](https://orcid.org/0000-0003-3108-3016), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3108-3016>

¹Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; ivanov.d.v.spb@74.ru✉, dashakonareikina2012@yandex.ru

²Joined Stock Company “FANPLAST”, ul. Dnepropetrovskaya, 8, Saint Petersburg, 191119, Russian Federation; ksenyabaca@gmail.com

Received on April 29, 2021 / Approved after reviewing on August 1, 2021 / Accepted on August 3, 2021

Abstract. Powdered paper-resin films (PRF) composed of melamine-urea-formaldehyde resin and bleached pulp seem to be promising fillers for plywood glues as they increase the viscosity of the glue composition and interact chemically with the components of urea-formaldehyde resins. It is generally accepted that when 4–6 % PRF is mixed with urea-formaldehyde resin, the viscosity of the glue increases by 80–110 %, however the increase in viscosity is followed by an increase in the gelatinization time of the glue by 25–35 %. The reactivity of the films defined by the polycondensation rate of urea- and melamine-urea-formaldehyde oligomers was studied by determining the residual hydroxymethyl groups in the cured adhesive compositions. Our results show that when we add PRF into the resin, the content of unreacted hydroxymethyl groups increases from 1.0 % of a composition without



any fillers to 2.5 % of a composition with 10 % of films in it. We found that the content of unreacted hydroxymethyl groups in the cured glue depends on the gelatinization time of the glue composition by 90 %. To speed up the glue curing, we replaced the ammonium chloride with a more effective curing agent MO-4СБ (Russian abbreviation), which helps to reduce the time of gelatinization time by 15 % for a mass fraction of 4–5 %. The content of hydroxymethyl groups in the cured glue with 4 % of PRF and 4–5 % of MO-4СБ was 0.6–0.7 %, which is 30–40 % less than in the resin without fillers. Samples of 3-layer plywood that contain 4 % of filler and 4 % of modifier-curing agent MO-4СБ had a glued seam that was 5 % stronger than that of a control plywood sample which consisted of 8 % of kaolin and 1 % of ammonium chloride. The increase in strength has reduced the rate of glue consumption by 15 % while meeting the requirements of the State Standard GOST 3916.1–2018 for the physical and mechanical parameters. As a result, using 4 % PRF as a filler for glue made from urea-formaldehyde resin helps to increase the viscosity of the glue on par with other mineral fillers. In addition, it increases the strength and the water resistance of the cured polymer. The growth of the physical and mechanical parameters occurs due to the polycondensation of urea- and melamine-urea-formaldehyde oligomers. However, an acceptable reaction rate requires the use of more effective curing agents than ammonium chloride.

Keywords: paper-resin films, urea-formaldehyde resin, melamine-formaldehyde resin, hydroxymethyl groups, fillers, modifier-curing agent, particle boards, plywood

For citation: Ivanov D.V., Baka K.E., Konareikina D.A. Powdered Paper-Resin Films as Reactive Fillers for Urea-Formaldehyde Resins. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 153–166. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-153-166>

Введение

На сегодняшний день для производства фанеры марки ФК используют главным образом клеи из карбаминоформальдегидной смолы (КФС), важным компонентом которых являются наполнители. Традиционно принято выделять минеральные и природные наполнители [2], такие как каолин, шунгит, оксид кремния, а также пшеничную, древесную или соевую муку. Их применение позволяет снизить усадку клея, препятствовать проникновению смолы в капилляры древесины и т. д. Однако практически все используемые в настоящее время наполнители инертны по отношению к компонентам КФС.

Перспективным представляется применение наполнителей, способных не только выполнять свои основные функции, но и взаимодействовать в ходе горячего прессования с карбаминоформальдегидными олигомерами (КФ-олигомерами). Включение в структуру отвержденного полимера новых соединений позволит придать ему особые свойства: увеличить прочность и водостойкость. Таким химическим модифицированием КФС можно добиться повышения качества продукции, смягчения режимов прессования, сокращения доли клея в составе фанеры.

Традиционно реакционноспособными по отношению к компонентам синтетических смол считаются природные наполнители [2, 6], однако непостоянство химического состава и низкая доступность активных центров усложняют их взаимодействие с КФ-олигомерами. Повысить химическую активность некоторых природных наполнителей можно предварительной физико-химической обработкой [15, 19], но это сопряжено с дополнительными энергетическими затратами.

Весьма эффективными реакционноспособными наполнителями являются высокомолекулярные соединения, которые могут либо растворяться в воде, либо образовывать с КФС стабильную дисперсионную систему. В работе [20] показано, что 0,5 % поливинилового спирта (ПВС), введенного в реакционную смесь на стадии синтеза смолы, повышает вязкость готового продукта на 15 % и снижает содержание свободного формальдегида на 40 %. В монографии [14] сообщается о способности гидроксильных групп ПВС взаимодействовать с гидроксиметильными группами КФ-олигомеров с образованием простых эфирных связей при совмещении спирта с готовой КФС. В результате образуется сополиконденсат, обладающий повышенной водостойкостью по сравнению с чистым карбамидоформальдегидным полимером. При совмещении с готовой смолой дисперсии поливинилацетата (ПВА) взаимодействуют в ходе горячего прессования функциональные группы ПВА и компоненты смолы, что повышает прочность и гидрофобность изготовленных из таких композиций древесностружечных плит (ДСтП) [14] и фанеры [16].

Придать КФС новые свойства можно совмещением ее с другими синтетическими смолами, такими как полиметиленидифенилдиизоцианаты [17, 21], резорциномеламиноформальдегидные смолы [6] и т. д. Наиболее простым путем является совмещение КФС с распространенными формальдегидсодержащими смолами: фенол-, меламино- и меламинокарбамидоформальдегидными смолами (соответственно ФФС, МФС и МКФС). Однако существующие промышленные ФФС с аминокформальдегидными смолами практически не соединяются, а смеси МФС или МКФС с КФС имеют меньшую реакционную способность, чем исходная КФС [10]. Если проблему низкой скорости взаимодействия КФ-олигомеров с меламино- и меламинокарбамидоформальдегидными олигомерами (соответственно МФ- и МКФ-олигомерами) можно решить использованием сильных отвердителей, то предотвратить проникание клея в капилляры древесины (основная функция наполнителей) за счет других синтетических смол невозможно.

Вместо чистых смол предлагается использовать бумажно-смоляные пленки (БСП), представляющие собой пропитанную МФС или МКФС бумагу из сульфитной беленой целлюлозы. БСП являются ценными, образующимися в больших количествах при изготовлении декоративных бумажно-слоистых пластиков и при ламинировании древесных плит отходами. В пересчете на сухие вещества в состав пленок входит 50...60 % терморепактивной смолы, 25...30 % целлюлозы и 15...20 % минеральных веществ [1], т. е. БСП представляют собой композицию, отлично подходящую для наполнения фанерных клеев. В наших ранних работах уже была показана пригодность БСП как связующего при изготовлении аминокпластов и ДСтП [3], а также как наполнителя фанерных клеев из ФФС марки СФЖ-3014 [8].

В статье приведены результаты исследования совместимости КФС с БСП. Изучали взаимодействие КФ- и МКФ-олигомеров в условиях горячего прессования фанеры, влияние рецептуры клеевой композиции и вида отвердителя на реакционную способность смесей и физико-механические показатели модельных ДСтП и фанеры.

Объекты и методы исследования

Исследовали БСП – отходы производства ООО «Завод слоистых пластиков». Измельчали пленки в лопастной дробилке и использовали порошок фракции 0,2/-. Физико-химические свойства пленок были следующие: количество летучих веществ – 4,8 %; общее количество смолы – 57,1 %; количество растворимой смолы – 67,0 %; содержание свободного формальдегида и гидроксиметильных групп – 0,85 и 5,5 % соответственно.

В качестве основного компонента клея использовали КФС марки КФ-МТ-15 [12]. Для отверждения клея на разных этапах исследования применяли хлорид аммония, чистый по ГОСТ 3773–72, или модификатор-отвердитель МО-4СБ [4]; для изготовления контрольных образцов клея – каолин марки КР-1 по ГОСТ 19608–84 как наиболее доступный и широко распространенный в промышленности минеральный наполнитель. Расчеты массовых долей компонентов клеев вели относительно смолы по товарным материалам, как это принято в технологии фанеры.

Условную вязкость клеевых композиций устанавливали с использованием вискозиметра ВЗ-4 по ГОСТ 8420–74; продолжительность желатинизации (время отверждения) измеряли при 100 °С по ГОСТ 14231–88. Реакционную способность смеси КФС и БСП при разных рецептурах клея определяли по количеству гидроксиметильных групп и свободного формальдегида в отвержденных композициях. Для этого отверждали клей, приготовленный таким образом, чтобы массовая доля абсолютно сухой смолы во всех случаях составляла 59 %. Если это значение оказывалось превышенным, то композицию разбавляли водой.

Для приготовления клея навеску товарной смолы около 10 г, взятую с точностью до 0,02 г, переносили в стакан вместимостью 50 см³ и разбавляли рассчитанным количеством воды. В разбавленную смолу последовательно вводили наполнитель и отвердитель. Около 0,5 г приготовленной композиции наносили на воздушно-сухую фильтровальную бумагу, предварительно взвешенную с точностью до 0,0001 г. Всего готовили 5 образцов так, чтобы расчетная суммарная масса клея на бумаге составляла около 2,5 г. На аналитических весах определяли массу каждой бумаги вместе с нанесенным на нее клеем с точностью до 0,0001 г, после чего бумаги размещали в специально изготовленном штативе, следя, чтобы они не соприкасались. Далее проводили термообработку в течение 2 мин при 110 °С.

Отвержденный клей помещали в стакан вместимостью 250 см³ и заливали 150 см³ воды, нагретой до 45...50 °С. Проводили экстракцию в течение 30 мин при температуре 40...45 °С, после чего содержимое стакана отфильтровывали в мерную колбу вместимостью 250 см³, промывали стакан 100 см³ дистиллированной воды и доводили уровень аликвоты в колбе до метки. В полученной смеси определяли содержание свободного формальдегида фотометрическим методом с использованием ацетилацетона [11] и содержание гидроксиметильных групп йодометрическим титрованием [5].

Количество свободного формальдегида в клее (%) рассчитывали по формуле

$$y = \frac{2C \cdot 250}{50m_{\text{кл}}} 100,$$

где C – масса формальдегида в растворе объемом 50 см³, г; $m_{\text{кл}}$ – суммарная масса отвержденной клеевой композиции, г.

Суммарное содержание свободного формальдегида и гидроксиметильных групп (%) вычисляли так:

$$x = \frac{3,75(V_1 - V_2)K}{m_{\text{кл}}},$$

где V_1 – объем 0,1 н. раствора тиосульфата натрия, израсходованного на титрование в «холостом» опыте, см³; V_2 – объем 0,1 н. раствора тиосульфата натрия, израсходованного на титрование в «рабочем» опыте, см³; K – поправочный коэффициент.

Содержание гидроксиметильных групп в отвержденном клее (%) находили следующим образом:

$$z = 1,033(x - y).$$

Определяли зависимость между продолжительностью желатинизации клея и содержанием гидроксиметильных групп в отвержденных композициях. Для этого проводили обработку экспериментальных данных методом линейной корреляции с нахождением коэффициента корреляции r и проверкой полученной зависимости через сравнение расчетного (t_p) и табличного (t_r) критериев Стьюдента (при доверительной вероятности 0,95). Для подтверждения предположения о коррелированности факторов t_p должен быть больше t_r .

Структуру отвержденных клеев исследовали с помощью ИК-спектроскопии. Сравнение ИК-спектров КФС, отвержденной в присутствии разных добавок, позволяет провести качественный анализ карбамидоформальдегидного полимера и установить влияние наполнителей и отвердителей на его структуру. Кроме того, применительно к КФС ИК-спектры дают комплексную информацию о полимере, т. к. их полосы поглощения (сигналы) показывают энергетические переходы, характерные для определенных связей между атомами.

Перед анализом образцов готовили разные варианты клеевых композиций и отверждали их в термостате при температуре 110 °С в течение 2 мин. Отвержденные клеи кондиционировали при комнатной температуре в течение 30 мин, затем измельчали и отбирали фракцию 0,5/-. ИК-спектры получали на спектрометре марки ФСМ-1201, спектральный диапазон которого составляет 400...7800 см⁻¹, спектральное разрешение – 1,0 см⁻¹.

Для оперативной оценки влияния БСП на прочность и водостойкость клеевых связей изготавливали образцы ДСтП, моделируя температурные условия горячего прессования фанеры. В качестве связующего использовали исследуемые клеевые композиции. Поскольку плиты выступали в качестве моделей для испытаний фанерного клея, условия их изготовления отличались от общепринятых в технологии ДСтП. Размер образцов составлял 200 × 200 × 4 мм, расчетная плотность – 650 кг/м³. Плиты прессовали при температуре греющих плит пресса 110 °С в течение 2 мин (0,5 мин/мм толщины готовой плиты). Массовая доля абсолютно сухой смолы была 20 % от массы абсолютно сухой плиты. Высокое содержание связующего обусловлено необходимостью компенсировать мягкие условия горячего прессования с целью получения достоверных зависимостей. Гидрофобные добавки не использовали. Определяли прочность при изгибе по ГОСТ 10635–88, плотность, разбухание и водопоглощение в воде за 24 ч по ГОСТ 10634–88 и содержание формальдегида методом WKI [11].

На завершающем этапе работы изготавливали 3-слойную фанеру марки ФК из березового шпона толщиной 1,5 мм. Норма расхода клея составила 115 г/м², температура прессования – 110 °С, давление прессования – 1,8 МПа,

продолжительность прессования – 5 мин. Перед горячим прессованием проводили холодную подпрессовку пакета, выдерживая его под давлением 0,8 МПа в течение 30 мин. В горячий пресс пакеты загружали стопкой из 3 пакетов, расположенных один над другим (9 листов шпона в каждой стопке). Определяли толщину толщиномером с ценой деления 0,1 мм, прочность при скалывании по клеевому слою после выдержки в воде в течение 24 ч по ГОСТ 9624–2009, плотность и влажность по ГОСТ 9621–72. При обработке результатов испытаний древесных плит и фанеры для каждого показателя устанавливали доверительный интервал по известным методикам.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследовали влияние БСП на условную вязкость и продолжительность отверждения клеевой композиции. При этом массовую долю наполнителя варьировали от 2 до 10 %, содержание хлорида аммония в клее зафиксировали на уровне 1 %. Согласно данным рис. 1, а, при совмещении БСП с КФС вязкость увеличивается, что можно объяснить наличием в структуре пленок целлюлозы и минеральных наполнителей. Рациональной можно считать массовую долю БСП в клею 4...6 %, при которой вязкость возрастает на 80...110 %. Это сопоставимо с результатами, обеспеченными наиболее распространенным минеральным наполнителем – каолином, введенным при массовой доле 8...10 % [7, 13].

Однако совмещение КФС с измельченными БСП обуславливает рост продолжительности желатинизации клея. При массовой доле наполнителя 4...6 % время отверждения увеличивается на 25...35 %, что связано с наличием в пленках пропиточной МКФС. Известно, смолы, имеющие в цепочках олигомеров остатки меламина, обладают меньшей скоростью отверждения из-за большого числа активных аминогрупп. Кроме того, пропиточным смолам, характеризующимся меньшей молекулярной массой олигомеров, требуется больше времени для трехмерной поликонденсации, чем клеящим. Реакционная способность клеевой композиции при увеличении массовой доли БСП снижается (рис. 1, б).

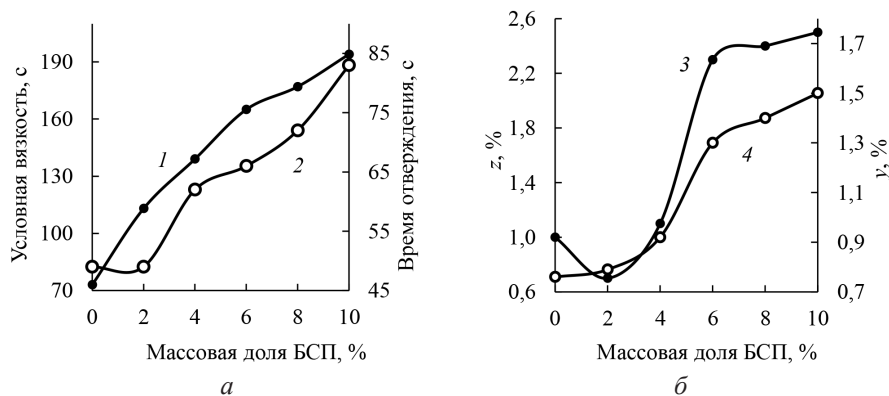


Рис. 1. Влияние массовой доли наполнителя на: а – условную вязкость (1) и продолжительность желатинизации (2) карбамидоформальдегидного клея; б – содержание гидроксиметильных групп (3) и свободного формальдегида (4) в отвержденном клею

Fig. 1. The effect of the mass fraction of the filler on: а – viscosity (1) and gelatinization time (2) of urea-formaldehyde glue; б – content of hydroxymethyl groups (3) and free formaldehyde (4) in the cured glue composition

На кривой 3 рис. 1 видно, что отвержденный клей, имеющий 4...6 % наполнителя, содержит в 1,5...2,0 раза больше гидроксиметильных групп по сравнению с клеем без БСП. О совместной поликонденсации КФ-олигомеров смолы и МКФ-олигомеров БСП можно утверждать только при введении наполнителя с массовой долей 2 %, т. к. в данном случае содержание гидроксиметильных групп в отвержденном клее меньше, чем в отвержденной КФС без БСП.

Экспериментальные данные, полученные при испытании клея, обрабатывали методом линейной корреляции, определяя зависимость содержания гидроксиметильных групп в отвержденном клее от продолжительности желатинизации. Коэффициент r составил 0,9; расчетный критерий Стьюдента – 4,0; табличный критерий Стьюдента – 2,8. Поскольку $t_p > t_r$, данные корреляционного анализа достоверны. Таким образом, количество остаточных гидроксиметильных групп на 90 % определяется продолжительностью желатинизации клея и на 10 % другими факторами.

Негативное влияние БСП на клеящую способность композиции подтвердили при испытании модельных образцов ДСтП (табл. 1). Состав связующего воспроизводил состав клея, с использованием которого делают фанеру (вязкость связующего приведена на кривой 1 рис. 1).

Таблица 1

Влияние массовой доли порошков из бумажно-смоляных пленок в связующем на физико-механические показатели древесностружечных плит

Table 1

The effect of the mass fraction of powders made of PRFs in the binder on the physical and mechanical parameters of particle boards

Показатель	Массовая доля, %					Контроль
	2	4	6	8	10	
ρ , кг/м ³	694 ± 26	672 ± 23	656 ± 31	662 ± 37	649 ± 24	684 ± 21
$\sigma_{изг}$, МПа	17,7 ± 0,6	14,1 ± 0,7	13,6 ± 0,7	12,8 ± 0,6	11,7 ± 0,7	16,3 ± 0,5
ΔW , %	95 ± 5	92 ± 4	100 ± 5	99 ± 6	102 ± 5	89 ± 5
ΔS , %	37 ± 4	36 ± 2	44 ± 3	48 ± 3	53 ± 4	35 ± 4
$E_{ф}$, мг/100г	9,6 ± 0,4	11,5 ± 0,5	12,0 ± 0,4	12,3 ± 0,3	12,4 ± 0,5	10,1 ± 0,4

Примечание: ρ – плотность; $\sigma_{изг}$ – прочность при изгибе; ΔW , ΔS – водопоглощение и разбухание соответственно в воде за 24 ч; $E_{ф}$ – содержание формальдегида по WKI. В качестве контроля использовали клеевую композицию, содержащую каолин при массовой доле 8 %.

Согласно данным табл. 1, в сравнении с контролем (плиты из клея с 8 % каолина и 1 % хлорида аммония) образцы, содержащие БСП, отличаются повышенной токсичностью, низкими прочностью и водостойкостью. Исследуемый наполнитель не оказывает негативного влияния на показатели плит только при массовой доле 2 %, что согласуется с результатами химического анализа. Однако, как было установлено ранее, клей с малым содержанием БСП не обладает приемлемой вязкостью, это не позволяет считать полученный результат удовлетворительным. Требуется искать пути повышения реакционной способности смеси КФС с БСП.

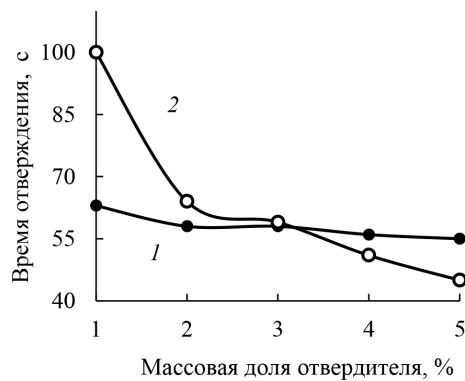
Как один из возможных путей углубления взаимодействия КФ- и МКФ-олигомеров рассматривали увеличение расхода отвердителя. Испытывали

2 катализатора отверждения: хлорид аммония и модификатор-отвердитель МО-4СБ, предназначенный для ускоренного отверждения аминоформальдегидных смол. В ходе эксперимента содержание БСП зафиксировали на уровне 4 %, массовые доли отвердителей варьировали от 1 до 5 %.

Согласно данным рис. 2, увеличение массовой доли хлорида аммония не приводит к значительному сокращению продолжительности желатинизации клея. МО-4СБ при массовой доле менее 3 % также неэффективен, однако дальнейшее увеличение расхода модификатора-отвердителя ощутимо ускоряет желатинизацию. Так, клей с 5 % МО-4СБ отверждается на 18 % быстрее, чем с 5 % хлорида аммония, и практически за то же время, что клей без БСП и с 1 % хлорида аммония.

Рис. 2. Влияние массовой доли хлорида аммония (1) и МО-4СБ (2) на продолжительность желатинизации карбамидоформальдегидного клея, содержащего 4 % БСП

Fig. 2. The effect of the mass fraction of ammonium chloride (1) and МО-4СБ (2) on gelatinization time of urea-formaldehyde glue containing 4 % of PRFs



Результаты химического анализа подтвердили бóльшую эффективность МО-4СБ по сравнению с хлоридом аммония. Повышение массовой доли хлорида аммония не только не приводит к снижению числа непрореагировавших гидроксиметильных групп, но даже увеличивает их (рис. 3, а), что можно объяснить особенностью анализа. Вероятно, из-за избытка кислоты, которую дает отвердитель, во время экстрагирования отвержденного клея происходит гидролитическая деструкция карбамидомеламиноформальдегидного полимера с образованием новых гидроксиметильных групп. Очевидно отсутствие положительного эффекта от применения хлорида аммония.

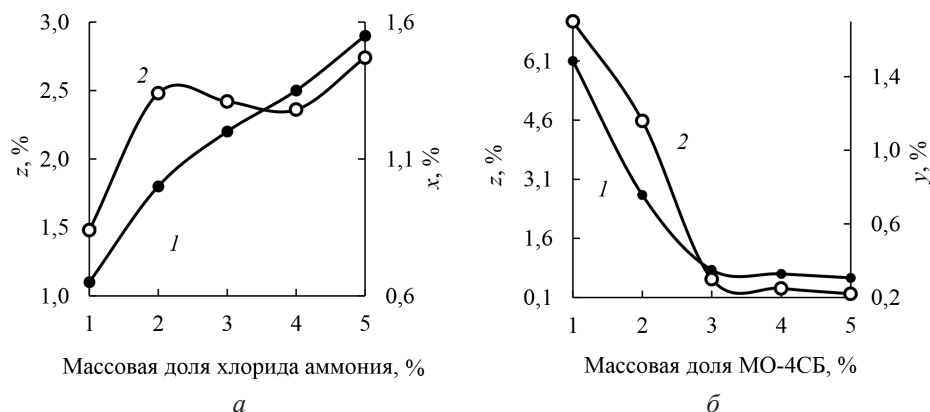


Рис. 3. Влияние массовой доли хлорида аммония (а) и МО-4СБ (б) на содержание гидроксиметильных групп (1) и свободного формальдегида (2) в отвержденном клее
Fig. 3. The effect of the mass fraction of ammonium chloride (а) and МО-4СБ (б) on the content of hydroxymethyl groups (1) and free formaldehyde (2) in the cured glue composition

Замена хлорида аммония на МО-4СБ позволяет значительно повысить реакционную способность смеси КФ- и МКФ-олигомеров (рис. 3, б). Модификатор-отвердитель неэффективен при малых расходах, однако при массовой доле более 3 % содержание гидроксиметильных групп в отвержденном клее становится ниже 1 %, т. е. меньше, чем в клее без БСП.

Для сравнения структуры отвержденных клеев методом ИК-спектроскопии исследовали композиции, полученные без наполнителей, с 1 % хлорида аммония, и образцы, содержащие 8 % каолина и 1 % хлорида аммония, 4 % БСП и 5 % хлорида аммония, 4 % БСП и 4 % МО-4СБ (рис. 4). Все варианты имеют сигналы, характерные для отвержденных КФС [9, 18], однако у образца, содержащего 4 % БСП и 4 % МО-4СБ, наиболее четко проявляется сильная полоса в области 2960 см^{-1} , относящая к валентным колебаниям связи С–Н в метиленовых связях ($-\text{CH}_2-$).

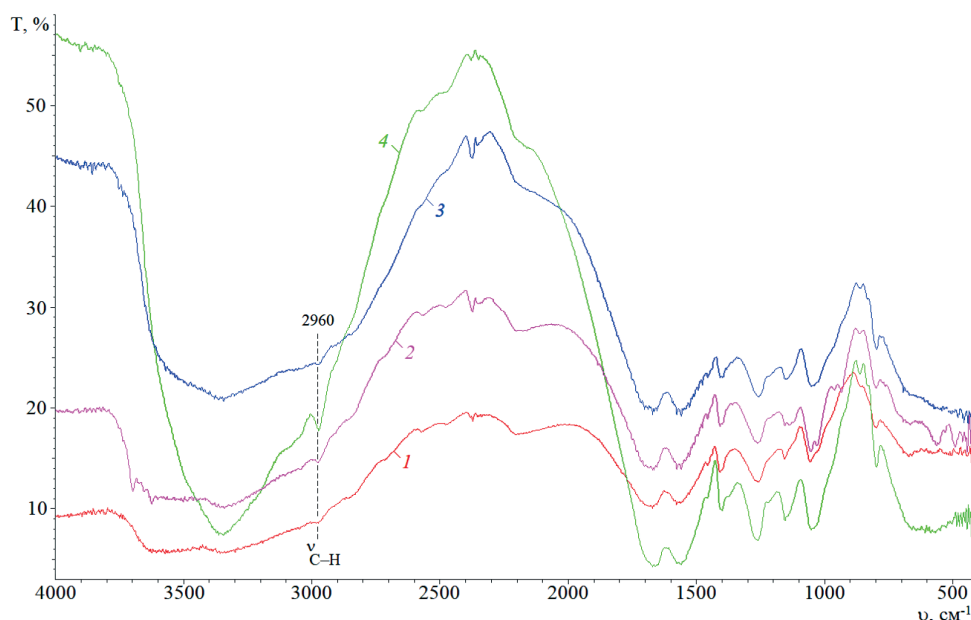


Рис. 4. ИК-спектры отвержденных образцов карбамидоформальдегидного клея в композициях: 1 – без наполнителей, с 1 % хлорида аммония; 2 – с 8 % каолина и 1 % хлорида аммония; 3 – с 4 % БСП и 5 % хлорида аммония; 4 – с 4 % БСП и 4 % модификатора-отвердителя МО-4СБ

Fig. 4. IR spectra of cured samples of urea-formaldehyde glue in compositions: 1 – without adding any fillers, with 1 % of ammonium chloride; 2 – with 8 % of kaolin and 1 % of ammonium chloride; 3 – with 4 % of PRFs and 5 % of ammonium chloride; 4 – with 4 % of PRFs and 4 % of modifier-curing agent MO-4СБ

Увеличение количества метиленовых связей говорит о более глубоком отверждении клея и, в случае смеси КФС и БСП, взаимодействии КФ- и МКФ-олигомеров в условиях горячего прессования. Важно отметить, что образец, содержащий 4 % БСП и 5 % хлорида аммония, не дает подобного результата. Это подтверждает данные химического анализа, указывающие на отсутствие сополиконденсации КФ- и МКФ-олигомеров при использовании классического отвердителя.

Испытания модельных образцов ДСтП (табл. 2) показали, что с увеличением массовой доли МО-4СБ в клеевой композиции растут прочность и водостойкость плит, снижается их токсичность. Плиты из связующего, содержащего 4 % БСП и 4...5 % модификатора-отвердителя, имеют физико-механические показатели, сопоставимые с показателями плит из связующего, содержащего 8 % каолина и 1 % хлорида аммония (см. табл. 1). При этом количество формальдегида в плитах с исследуемыми наполнителями на 40 % ниже по сравнению с контрольным образцом.

Таблица 2

Влияние массовой доли отвердителя в связующем на физико-механические показатели древесностружечных плит

Table 2

The effect of the mass fraction of the curing agent in the binder on the physical and mechanical parameters of the particle boards

Показатель	4 % БСП при массовой доле МО-4СБ, %					Контроль
	1	2	3	4	5	
ρ , кг/м ³	623 ± 34	619 ± 25	626 ± 27	628 ± 31	629 ± 24	637 ± 20
$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	10,1 ± 1,5	11,3 ± 1,3	14,6 ± 2,2	16,8 ± 2,2	19,2 ± 2,1	13,0 ± 1,3
ΔW , %	92 ± 11	102 ± 10	98 ± 7	92 ± 10	92 ± 4	104 ± 5
ΔS , %	45 ± 4	38 ± 4	37 ± 3	30 ± 3	30 ± 3	44 ± 6
$E_{\text{ф}}$, мг/100 г	13,1 ± 0,3	8,2 ± 0,3	5,9 ± 0,4	6,0 ± 0,3	6,1 ± 0,2	7,0 ± 0,4

Примечание: Контроль – ДСтП из клея с 4 % БСП и 5 % хлорида аммония.

Отдельно следует сказать о показателях плит со связующим из 4 % БСП и 5 % хлорида аммония (контроль). Низкие результаты физико-механических испытаний косвенно подтверждают результаты химического и инструментального (ИК-спектроскопия) анализа отвержденных клеев. Очевидно, что даже при больших расходах хлорид аммония не подходит для отверждения композиции из КФС и БСП.

Согласно данным табл. 3, фанера, изготовленная из клея, содержащего 4 % БСП и 4 % МО-4СБ, имеет на 15 % большую прочность при скалывании по клеевому слою, чем фанера из клея с контрольной рецептурой (8 % каолина и 1 % хлорида аммония).

Таблица 3

Физико-механические показатели фанеры

Table 3

Physical and mechanical parameters of plywood

Показатель	4 % БСП при норме расхода клея		6 % БСП при норме расхода клея		Контроль
	97 г/м ²	115 г/м ²	97 г/м ²	115 г/м ²	
ρ , кг/м ³	580 ± 15	680 ± 14	582 ± 14	694 ± 11	703 ± 11
h , мм	4,3 ± 0,1	4,3 ± 0,1	4,3 ± 0,1	4,2 ± 0,1	4,3 ± 0,1
ω , %	5,1 ± 0,3	5,0 ± 0,4	5,8 ± 0,3	5,9 ± 0,5	3,7 ± 0,3
$\sigma_{\text{ск}}$, МПа	1,05 ± 0,05	1,45 ± 0,03	0,91 ± 0,04	1,06 ± 0,05	1,20 ± 0,07

Примечание: h – толщина; ω – влажность; $\sigma_{\text{ск}}$ – предел прочности при скалывании по клеевому слою. Контроль – фанера из клея с 8 % каолина и 1 % хлорида аммония.

Увеличение прочности позволяет сократить норму расхода клея почти на 15 %. При этом клей, содержащий 4 % БСП, обеспечивает значение показателя в пределах требований стандарта. Такого же эффекта с фанерой из клея, содержащего 6 % БСП и 4 % МО-4СБ, добиться не удалось. Очевидно, каталитического действия модификатора-отвердителя при таком расходе недостаточно для придания фанере свойств даже на уровне контроля и требуется корректировка рецептуры.

Выводы

1. Бумажно-смоляные пленки, измельченные в порошок фракции 0,2/–, при совмещении с карбамидоформальдегидной смолой выполняют основную функцию наполнителей фанерных клеев. Условная вязкость клеевой композиции при ведении в смолу 4...6 % порошка увеличивается на 80...110 %.

2. Бумажно-смоляные пленки благодаря содержанию пропиточной меламинокарбамидоформальдегидной смолы могут действовать как реакционноспособные по отношению к компонентам карбамидоформальдегидной смолы соединения, однако для химического взаимодействия в условиях горячего прессования фанеры требуется заменить хлорид аммония на более эффективный отвердитель. Определением остаточных гидроксиметильных групп в отвержденных клеях, а также анализом ИК-спектров отвержденных композиций обнаружена совместная поликонденсация карбамидо- и меламинокарбамидоформальдегидных олигомеров при совмещении карбамидоформальдегидной смолы с 4 % бумажно-смоляных пленок и 4 % модификатора-отвердителя МО-4СБ.

3. Образцы модельных древесностружечных плит и фанеры, содержащие композиции из 4 % бумажно-смоляных пленок и 4...5 % МО-4СБ, отличаются большими прочностью, водостойкостью и меньшей токсичностью, чем образцы из клея с классической рецептурой (8 % каолина и 1 % хлорида аммония). Прочность при скалывании по клеевому слою у фанеры из клея с 4 % порошка из бумажно-смоляных пленок и 4 % МО-4СБ на 15 % выше, чем у контроля. Рост прочности позволяет сократить норму расхода клея на 15 % при сохранении прочностных показателей в пределах требований ГОСТ 3916.1–2018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Бараш Л.И.* Слоистые пластики, декоративные поверхности. СПб.: Химиздат, 2007. 256 с.

Barash L.I. *Laminates and Decorative Surfaces*. Saint Petersburg, Khimizdat Publ., 2007. 256 p. (In Russ.).

2. *Волков А.В., Кондратьев В.П., Орлов А.Т., Редькина Т.П., Шевандо Т.В., Шорникова Н.Ю., Варыгин В.С., Филиппова Е.О., Соколова Е.Г.* Справочник фанерщика / под ред. А.В. Волкова, А.Т. Орлова. СПб.: Политехн. ун-т, 2010. 486 с.

Volkov A.V., Kondrat'yev V.P., Orlov A.T., Red'kina T.P., Shevando T.V., Shornikova N.Yu., Varygin V.S., Filippova E.O., Sokolova E.G. *Handbook of Plywood Producer*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2010. 486 p. (In Russ.).

3. *Гамова И.А., Абрамов Н.А., Чернышева Э.С.* Использование отходов декоративных бумажно-смоляных пленок // Древесные плиты: теория и практика: материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф., 20–21 марта 2019 г. / под ред. А.А. Леоновича. СПб.: Политехн. ун-т, 2019. С. 48–52.

Gamova I.A., Abramov N.A., Chernysheva E.S. Waste Processing of Decorative Paper-Resin Films. *Wood Boards: Theory and practice. Proceedings of the 22nd International Scientific and Practical Conference*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2019, pp. 48–52. (In Russ.).

4. Иванов Д.В., Екатеринчева М.А., Калашников А.А., Печковская Д.А., Никифорова П.К., Елисейев Д.М. Использование модификаторов-отвердителей серии МО-4 как компонентов клеев из карбамидоформальдегидной смолы // *Древесные плиты и фанера: теория и практика: материалы Всерос. науч.-практ. конф.*, 17–18 марта 2021 г. СПб.: Политех-Пресс, 2021. С. 110–117.

Ivanov D.V., Ekaterincheva M.A., Kalashnikov A.A., Pechkovskaya D.A., Nikiforova P.K., Eliseyev D.M. The Use of MO-4 Series Modifiers-Hardening Agents as Components of Urea-Formaldehyde Resin Glues. *Wood Boards: Theory and Practice. Proceedings of the 24th International Scientific and Practical Conference*. Saint Petersburg, Politekh-Press, 2021, pp. 110–117. (In Russ.).

5. Кастерина Т.Н., Калинина Л.С. Химические методы исследования синтетических смол и пластических масс. М.: Госхимиздат, 1963. 288 с.

Kasterina T.N., Kalinina L.S. *Chemical Methods for Studying Synthetic Resins and Plastics*. Moscow, Goskhimizdat Publ., 1963. 288 p. (In Russ.).

6. Кондратьев В.П., Доронин Ю.Г. Водостойкие клеи в деревообработке. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 216 с.

Kondrat'yev V.P., Doronin Yu.G. *Waterproof Glues for Woodworking*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 216 p. (In Russ.).

7. Мурзин В.С., Кантиева Е.В., Пономаренко Л.В. Эффективность применения наполнителей при производстве фанеры на малотоксичных карбамидоформальдегидных смолах // *Лесотехн. журн.* 2012. № 3(7). С. 20–24.

Murzin V.S., Kantiyeva E.V., Ponomarenko L.V. Efficiency of Fillers in the Production of Plywood Based on Low-Toxic Urea-Formaldehyde Resins. *Forestry Engineering Journal*, 2012, no. 3(7), pp. 20–24. (In Russ.).

8. Пермяков А.В., Гамова И.А., Иванов Д.В. Модифицирование клея для фанеры измельченными отходами бумажно-смоляных пленок // *Древесные плиты и фанера: теория и практика: материалы Всерос. науч.-практ. конф.*, 17–18 марта 2021 г. СПб.: Политех-Пресс, 2021. С. 94–98.

Permyakov A.V., Gamova I.A., Ivanov D.V. Modification of Plywood Glue with Shredded Waste of Paper-Resin Films. *Wood Boards: Theory and Practice. Proceedings of the 24th International Scientific and Practical Conference*. Saint Petersburg, Politekh-Press, 2021, pp. 94–98. (In Russ.).

9. Плотникова Г.П., Плотников Н.П. Модификация связующего для использования некондиционного сырья в производстве древесностружечных плит // *Системы. Методы. Технологии.* 2013. № 2(18). С. 142–146.

Plotnikova G.P., Plotnikov N.P. Modification of Binder to Use Off-Grade Raw Materials in Chipboard Production. *Systems. Methods. Technologies*, 2013 vol. 2(18), pp. 142–146. (In Russ.).

10. Романов Н.М. Отверждение смесей карбамидоформальдегидных и меламиноформальдегидных смол. Существование критических соотношений // *Состояние и перспективы развития производства древесных плит: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф.*, 15–16 марта 2006 г. Балабаново, 2006. С. 76–85.

Romanov N.M. Hardening of Urea-Formaldehyde and Melamine-Formaldehyde Resins Mixtures. Existence of Critical Ratios. *State and Prospects for the Development of Wood-Based Panels: Abstracts of the International Scientific and Practical Conference*. Balabanovo, 2006, pp. 76–85. (In Russ.).

11. *Роффаэль Э.* Выделение формальдегида из древесностружечных плит: пер. с нем. А.П. Штембаха и В.Б. Семеновой / под ред. А.А. Эльберта. М.: Экология, 1991. 160 с.
Roffael E. *Die Formaldehyd-Abgabe von Spanplatten und anderen Werkstoffen*. Transl. from German by A.P. Shtembakh and V.B. Semyonova. Ed. by A.A. El'bert. Moscow, Ekologiya Publ., 1991. 160 p. (In Russ.).
12. Смола карбамидоформальдегидная КФМТ-15 // ПКФ Поволжье. Режим доступа: <http://pkf-volga.ru/smola-karbamidoformaldegidnaya-kfmt-15> (дата обращения: 23.04.21).
Urea-Formaldehyde Resin КФМТ-15. *PKF Povolzhye*. (In Russ.).
13. *Шишаков Е.П., Шпак С.И., Чубис П.А., Шевчук М.О.* Влияние наполнителей и катализаторов на физико-химические свойства карбамидоформальдегидных смол // Тр. БГТУ. № 4. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2015. № 4(177). С. 102–108.
Shishakov E.P., Shpak S.I., Chubis P.A., Shevchuk M.O. Fillers and Catalysts Effect on the Physicochemical Properties of Urea-Formaldehyde Resins. *Proceedings of BSTU, Series 4. Chemistry, Organic Substances, Technology and Biotechnology*, 2015, no. 4(177), pp. 102–108. (In Russ.).
14. *Эльберт А.А.* Химическая технология древесностружечных плит. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 224 с.
El'bert A.A. *Chemical Technology of Particle Boards*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 224 p. (In Russ.).
15. Ayrilmis N., Kwon J.-H., Lee S.-H., Han T.-H., Park C.-W. Microfibrillated-Celulose-Modified Urea-Formaldehyde Adhesives with Different F/U Molar Ratios for Wood-Based Composites. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2016, vol. 30, iss. 18, pp. 2032–2043. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1175246>
16. Cui H.-W., Du G.-B. Development of a Novel Polyvinyl Acetate Type Emulsion Curing Agent for Urea Formaldehyde Resin. *Wood Science and Technology*, 2013, vol. 47, iss. 1, pp. 105–119. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0489-4>
17. Dziurka D., Mirski R. Properties of Liquid and Polycondensed UF Resin Modified with pMDI. *Drvna Industrija*, 2014, vol. 65, no. 2, pp. 115–119. <https://doi.org/10.5552/drind.2014.1321>
18. Edoga M. Ethylated Urea-Ether-Modified Urea-Formaldehyde Resins, Part I: Structural and Physic Chemical Properties. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 2006, vol. 5(9), pp. 121–136.
19. Kunaver M., Medved S., Čuk N., Jasiukaitytė E., Poljanšek I., Strnad T. Application of Liquefied Wood as a New Particle Board Adhesive System. *Bioresource Technology*, 2010, vol. 101, iss. 4, pp. 1361–1368. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.066>
20. Wang Z., Xue J.W., Qu J.B., Liu W.X. Synthesis of Wood Lignin-Urea-Formaldehyde Resin Adhesive. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 560-561, pp. 242–246. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.560-561.242>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 691.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-167-178

Численное исследование напряженно-деформированного состояния модифицированной деревянной балки

Д.А. Чибрикин¹✉, аспирант; ResearcherID: [ACW-3805-2022](https://orcid.org/0000-0001-9278-4559),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9278-4559>

М.В. Лукин¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [E-8085-2019](https://orcid.org/0000-0002-2033-3473),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2033-3473>

А.В. Лукина¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [O-1352-2016](https://orcid.org/0000-0001-6065-678X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

Т.В. Тюрикова², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [P-8991-2019](https://orcid.org/0000-0002-3592-310X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-310X>

С.И. Рощина¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [A-7722-2019](https://orcid.org/0000-0003-0356-1383),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

¹Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, ул. Горького, д. 87, г. Владимир, Россия, 600000; dachibrikin@outlook.com✉, lukin_mihail_22@mail.ru, pismo.33@yandex.ru, rsi3@mail.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; t.turikova@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.05.21 / Одобрена после рецензирования 16.08.21 / Принята к печати 20.08.21

Аннотация. Сохранение памятников деревянного зодчества требует особого внимания, так как в процессе эксплуатации на протяжении 100 лет и более деревянные конструкции подвергаются атмосферным воздействиям, в результате чего ухудшается несущая способность этих конструкций. Для зданий, представляющих историческую ценность, применение внешних систем усиления конструкции влечет потерю архитектурного облика. Предлагаемый способ восстановления несущей способности разрушенных деревянных балок в опорных зонах основан на их модификации полимерной композицией. Рассмотрены 3 типа балок из сосны: разрушенная, модифицированная в опорных зонах; деревянная, ослабленная разрушением; «здоровая». Выполнен численный расчет балок длиной 6 м и сечением 100×200 мм в программном комплексе «Лира». Расчетная модель рассматриваемых балок построена путем адаптации исходных данных для рабочей среды используемого программного комплекса. Вычислительная модель задана как объемное тело, полученное путем триангуляции и «выдавливания» проекционного разреза балки. По разработанной методике расчета деревянных балок определены касательные напряжения в приопорной зоне, а также вертикальные перемещения балок. Проведено сравнение показателей модифицированной балки и эталонной «здоровой» конструкции. Касательные напряжения в усиленной балке превышают на 15–17 % показатели «здоровой» балки. Установлено, что прочность разрушенной балки, модифицированной на опорах, увеличилась на 16–18 % по сравнению с разрушенной балкой. На основании полученных результатов определены граничные условия применения модификации разрушенных деревянных балок в опорных зонах для восстановления их не-

сущей способности. Если потеря несущей способности составляет более 35 %, то данный способ не рекомендуется применять ввиду целесообразности замены таких конструкций.

Ключевые слова: численные исследования, полимерная композиция, модификация деревянной балки, прочность древесины, деревянная балка, деструкция древесины, нагружение деревянной балки, сохранение деревянной архитектуры

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01579, <https://rscf.ru/project/22-29-01579/>. Исходные данные для исследования в виде нелинейной численной модели деревянной балки разработаны в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2972.2021.4).

Для цитирования: Чибрикин Д.А., Лукин М.В., Лукина А.В., Тюрикова Т.В., Рощина С.И. Численное исследование напряженно-деформированного состояния модифицированной деревянной балки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 167–178. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-167-178>

Original article

Numerical Study of the Stress-Strain State of a Modified Wooden Beam

Danila A. Chibrikov¹✉, Postgraduate Student; ResearcherID: [ACW-3805-2022](https://orcid.org/0000-0001-9278-4559),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9278-4559>

Mikhail V. Lukin¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-8085-2019](https://orcid.org/0000-0002-2033-3473),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2033-3473>

Anastasiya V. Lukina¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [O-1352-2016](https://orcid.org/0000-0001-6065-678X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

Tatiana V. Tyurikova², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [P-8991-2019](https://orcid.org/0000-0002-3592-310X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-310X>

Svetlana I. Roshchina¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-7722-2019](https://orcid.org/0000-0003-0356-1383),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, ul. Gor'kogo, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation; dachibrikov@outlook.com✉, lukin_mihail_22@mail.ru, pismo.33@yandex.ru, rsi3@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; t.turikova@narfu.ru

Received on May 10, 2021 / Approved after reviewing on August 16, 2021 / Accepted on August 20, 2021

Abstract. Preservation of wooden architecture monuments requires special attention since during their operation for 100 years and more wooden structures are exposed to environmental influences resulting in weakening their bearing capacity. The use of external reinforcement systems for buildings of historical value leads to a loss of architectural look. The proposed method of restoring the bearing capacity of the destructed wooden beams in the support zones is based on modification with a polymer composition. We have considered 3 types of pine beams: destructed, modified in the support zones; wooden, weakened by destruction; “healthy”. Numerical calculation of beams with a length of 6 m and a cross-section of 100×200 mm is performed in the Lira software package. The calculation model of the beams considered was created by adapting the initial data for the working environment of the



software package used. The computational model is set as a three-dimensional body obtained by triangulation and “extrusion” of beam projection section. Shear stresses in the supporting zone, as well as vertical movements of the beams have been determined according to the developed method of calculation of wooden beams. The parameters of the modified beam and the reference “healthy” structure were compared. Shear stresses in the strengthened beam are 15–17 % higher than in the “healthy” beam. It was found that the strength of the destructed beam modified on supports increased by 16–18 % compared to the destructed beam. The boundary conditions for the modification of destructed wooden beams in the support zones to restore their bearing capacity have been determined on the basis of the obtained results. If the loss of bearing capacity is more than 35 %, then this method is not recommended due to the expediency of replacing such structures.

Keywords: numerical studies, polymer composition, modification of wooden beam, wood strength, wooden beam, wood destruction, loading of wooden beam, preservation of wooden architecture

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-01579, <https://rscf.ru/project/22-29-01579/>. Initial data for the study as a nonlinear numerical model of a wooden beam were developed within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of sciences (МК-2972.2021.4).

For citation: Chibrikov D.A., Lukin M.V., Lukina A.V., Tyurikova T.V., Roshchina S.I. Numerical Study of the Stress-Strain State of a Modified Wooden Beam. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 3, pp. 167–178. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-167-178>

Введение

В настоящее время в России остро стоит вопрос сохранения памятников деревянного зодчества – зданий, в несущих конструкциях которых использована древесина. В процессе эксплуатации такие конструкции подвергаются негативному воздействию различных сил (например, погодный, антропогенный факторы и др.), в результате чего происходит потеря конструкцией несущей способности. Для зданий, представляющих историческую ценность, применение внешних систем усиления становится причиной потери архитектурного облика. Атмосферное и иное увлажнение особенно сильно влияет на деревянные конструкции: влага снижает прочность, жесткость и долговечность древесины.

В работах [1, 13–15] рассмотрены режимы разрушений деревянных конструкций. Используют различные способы их восстановления и усиления [8, 20, 21, 23, 24, 27]. Известны комплексные исследования по практическому применению полимерных композиций при восстановлении деревянных конструкций [4, 6, 25, 37]. Разработаны технологические инновации в области наноструктурированных материалов для усиления и защиты деревянных конструкций [10, 26, 30, 35]. Проведены эксперименты по модификации поверхности древесины гидрофобным составом [19]. В Швейцарии изучаются балки из древесно-стеклянного композита [22]. Также рассматриваются нанокompозиты на основе бамбука [7]. Выполняются исследования в области химической модификации

древесины в целях повышения ее прочностных характеристик [29]. Существует экспериментальная программа испытаний усиления при изгибе клееного бруса, когда в него вклеиваются полимерные стержни, армированные стекловолокном [31]. Авторами работ [32, 33] изучены многопролетные композитные балки и установлено, что по сравнению с деревянными балками прочность композитных балок с рациональным усилением растянутых зон увеличивается на 24–27 %, а деформированность снижается на 8–13 %. Проанализированы численные исследования прочностных и деформационных характеристик узлового соединения деревянных конструкций, осуществленные в программном комплексе ANSYS [2].

Цель исследования – определить касательные напряжения в приопорных зонах модифицированной деревянной балки, ослабленной деструкцией, и сравнить полученные результаты с эталонной здоровой конструкцией.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – деструктированная деревянная балка, модифицированная полимерной композицией в опорных зонах.

Предмет – прочность древесины, усиленной полимерным композитом, на скалывающие касательные напряжения, возникающие в опорных частях балок.

Предлагаемый способ усиления деструктированной древесины заключается в импрегнировании в дефектную часть элементов деревянных конструкций полимерной композиции и создании древесно-полимерной композиции в деструктированной зоне (рис. 1). Такой подход к восстановлению является наиболее эффективным и перспективным. При этом необходимо провести дополнительные исследования технологии восстановления деревянных конструкций [5].

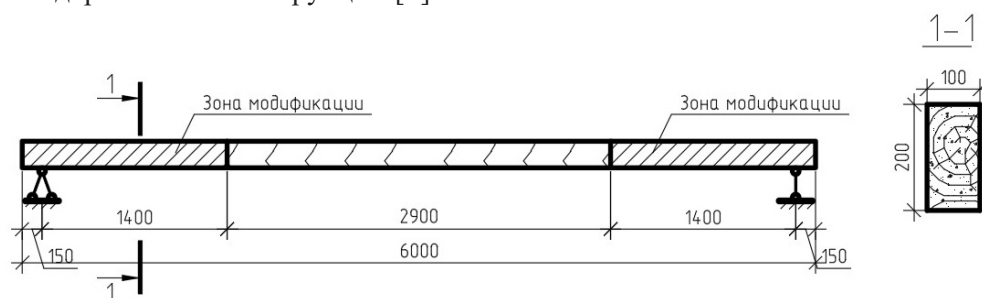


Рис. 1. Восстановление деструктированной балки

Fig. 1. Restoration of a destroyed beam

Численные исследования позволяют оценить характер распределения напряжения в теле балки, а также разрушающую нагрузку с учетом всех особенностей напряженно-деформированного состояния изучаемой конструкции.

Для расчетов был использован метод конечных элементов. Сетка конечных элементов принята размером 10 мм. Конечные элементы для древесины объемные. Диаграммы работы древесины под нагрузкой, вводимые в расчет,

приняты по результатам испытания стандартных образцов на растяжение, сжатие и скалывание. Созданы математические модели балок с разной плотностью и нелинейностью материала при их виртуальном нагружении с использованием программного комплекса «Лира» [3, 12, 16–18, 28].

При нагружении деревянных элементов внешней нагрузкой до разрушения отчетливо проявляются 3 последовательные стадии напряженно-деформированного состояния: условно упругая, упругопластическая, разрушение [9, 11, 34, 36]. Расчетная модель рассматриваемой балки построена путем адаптации исходных данных для рабочей среды программного комплекса «Лира». Вычислительная модель задана как объемное тело, полученное путем триангуляции и «выдавливания» проекционного разреза балки.

Проведены расчеты балок длиной 6 м и поперечным сечением 100×200 мм. По результатам расчетов для дальнейшего анализа и оценки эффективности модифицирования выведены изополя перемещений и напряжений, составлена сравнительная таблица, характеризующая работу балок.

Маркировка балок: Б-1 – «здоровая», Б-2 – деструктурированная, Б-3 – модифицированная на опорах деструктурированная. Для всех видов балок были заданы одинаковые условия закрепления и действующая нагрузка (рис. 2).

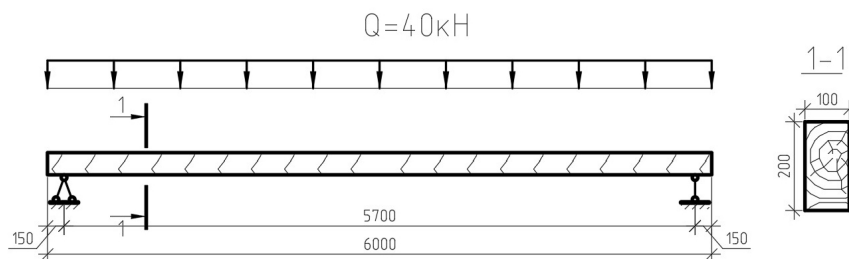


Рис. 2. Расчетная схема балок

Fig. 2. Design scheme of the beams

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе ранее проведенных исследований был определен состав полимерной композиции на основе Анакрола 90w2 с наполнителем КУНТ (карбоксилированные углеродные нанотрубки). Перечень элементов, входящих в состав, был получен на основе серии испытаний опытных образцов через установление физико-механических характеристик. Результаты вносили в уточненную расчетную математическую модель.

Для изучения напряженно-деформированного состояния балок была принята схема нагружения, которая имитирует рабочую нагрузку, равномерно распределенную по пролету. Нагрузки определялись по предельным напряжениям согласно приложению «В» СП 64.13330.2017 (Свод правил. Деревянные конструкции).

Результаты расчетов для модели балки Б-1 представлены на рис. 3, 4.

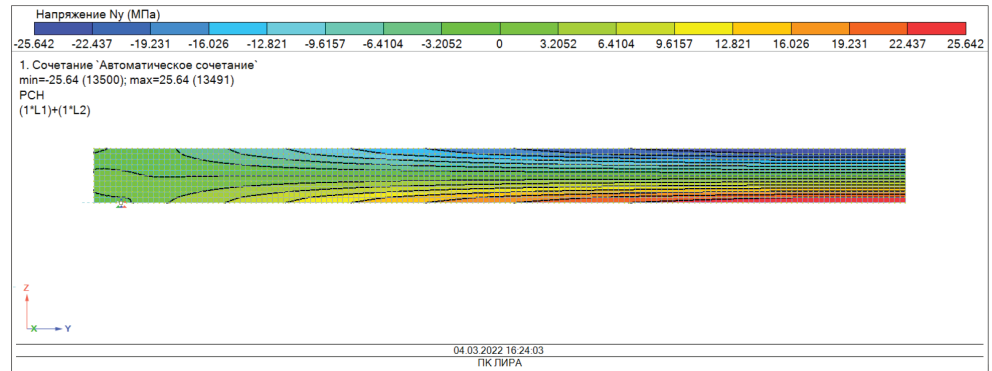
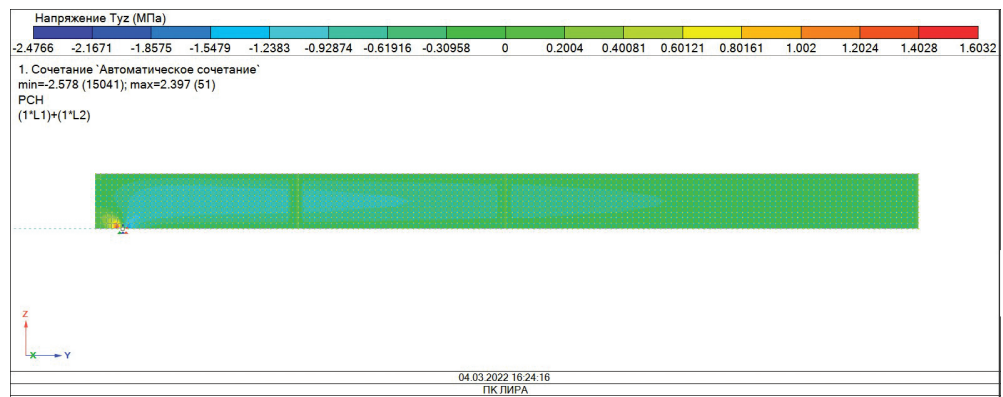
*a**b*

Рис. 3. Изополя напряжений (МПа) на половине пролета балки Б-1: *a* – продольные силы N_y ; *b* – касательные напряжения τ_{yz}

Fig. 3. Stress isofield (MPa) at the half of the beam span Б-1: *a* – longitudinal forces N_y ; *b* – share stresses τ_{yz}

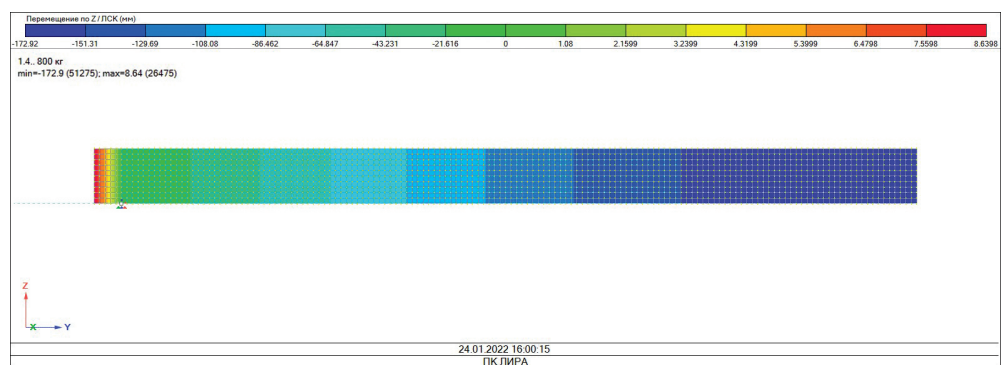
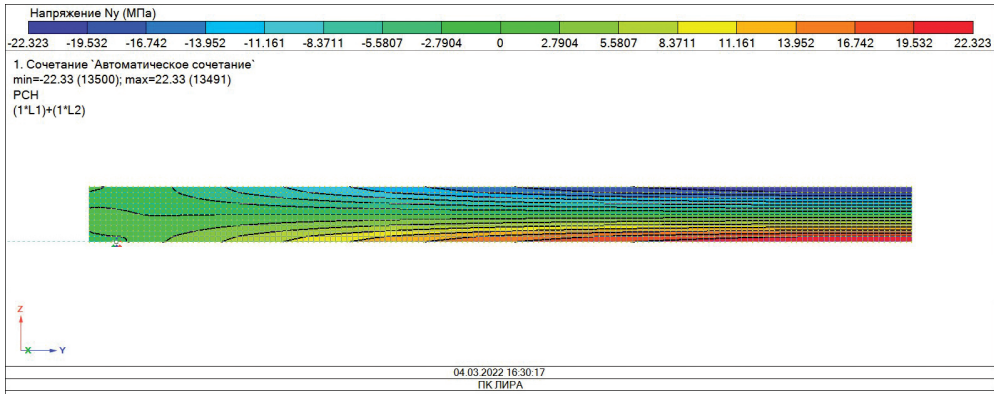


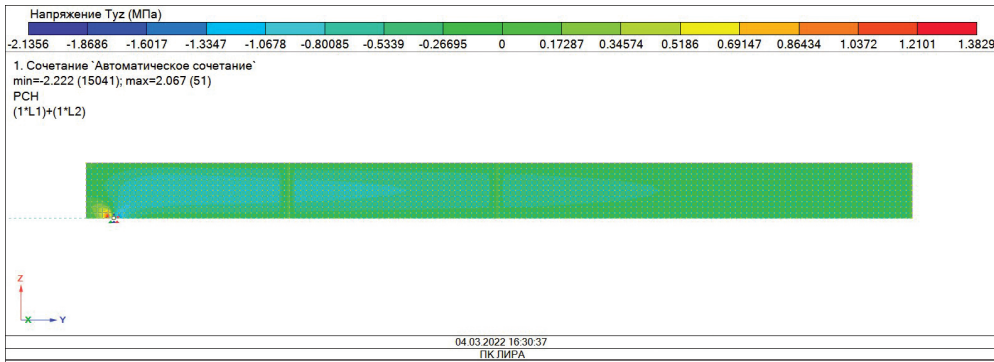
Рис. 4. Мозаика перемещений узлов вдоль оси Z на половине пролета балки Б-1

Fig. 4. Mosaic of node movements along the Z axis at the half of the beam span Б-1

Результаты расчетов для модели балки Б-2 приведены на рис. 5, 6.



a



б

Рис. 5. Изополя напряжений (МПа) на половине пролета балки Б-2: $a - N_y$; $б - \tau_{yz}$

Fig. 5. Stress isofield (MPa) at the half of the beam span Б-2: $a - N_y$; $б - \tau_{yz}$

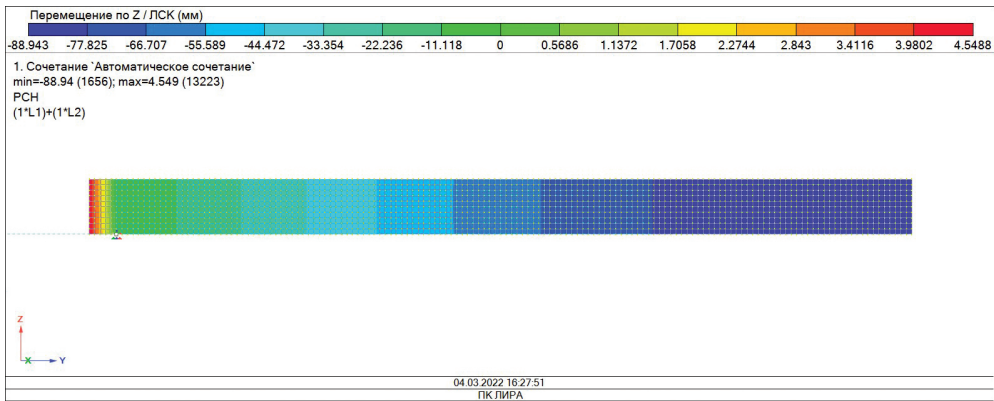
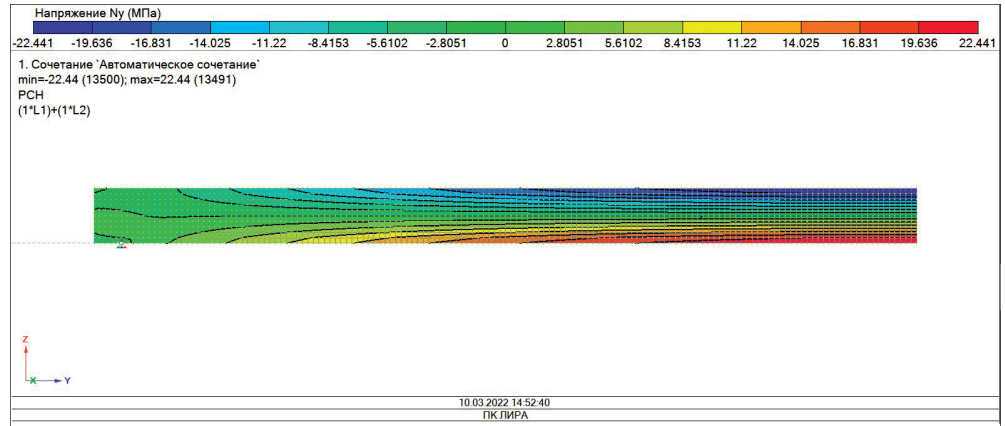


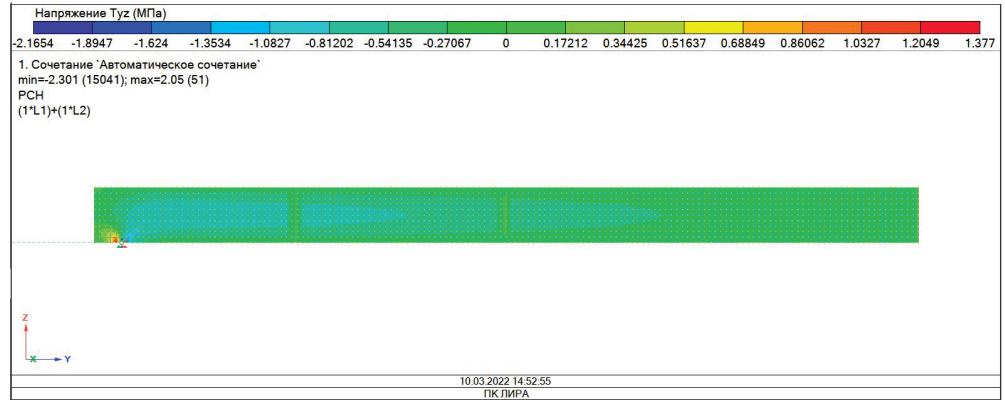
Рис. 6. Мозаика перемещений узлов вдоль оси Z на половине пролета балки Б-2

Fig. 6. Mosaic of node movements along the Z axis at the half of the beam span Б-2

Итоги расчетов для модели балки Б-3 выведены на рис. 7, 8.



а



б

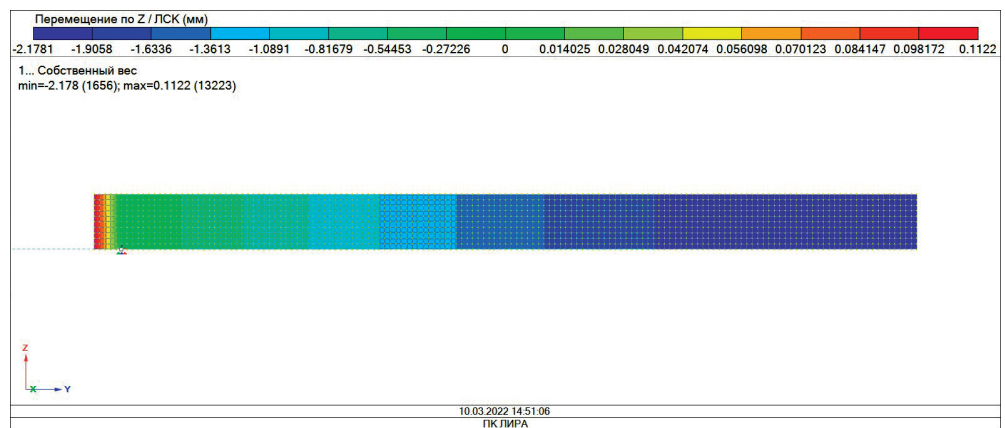
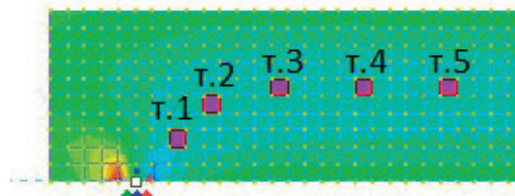
Рис. 7. Изополя напряжений (МПа) на половине пролета балки Б-3: а – N_y ; б – τ_{yz} Fig. 7. Stress isofield (MPa) at the half of the beam span Б-3: а – N_y ; б – τ_{yz} 

Рис. 8. Мозаика перемещений узлов вдоль оси Z на половине пролета балки Б-3

Fig. 8. Mosaic of node movements along the Z axis at the half of the beam span Б-3

В целях изучения скалывающих касательных напряжений, возникающих в опорной конструкции, были рассмотрены по 5 точек для каждой из 3 моделей балок. Общая схема расположения исследуемых точек касательных напряжений τ_{yz} представлена на рис. 9.

Рис. 9. Схема расположения исследуемых точек касательных напряжений τ_{yz}
Fig. 9. The layout of the points of the studied share stresses τ_{yz}



Значения касательных напряжений в опорной конструкции представлены в таблице.

Касательные напряжения (МПа) в исследуемых точках
Shear stresses (MPa) at the studied points

Балка	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
Б-1	-0,43	-0,42	-0,42	-0,41	-0,40
Б-2	-0,58	-0,57	-0,56	-0,54	-0,52
Б-3	-0,49	-0,48	-0,48	-0,47	-0,47

В ходе исследований определено, что касательные напряжения в разрушенной балке больше на 30–35 % по сравнению со «здоровой» балкой. Касательные напряжения в усиленной балке превышают на 15–17 % показатели «здоровой» балки. Прирост по прочности у модифицированной балки по сравнению с ослабленной деструкцией балкой составил 16–18 %.

На основании полученных результатов установлены граничные условия применения модификации разрушенных деревянных балок в опорных зонах опорных конструкций для восстановления их несущей способности. Если потеря несущей способности составляет более 35 %, то данный способ не рекомендуется применять ввиду целесообразности замены таких конструкций.

Выводы

1. Представлена методика расчета разрушенной деревянной балки, модифицированной в опорных зонах. Методика основана на расчетной модели в виде объемного тела с заданными характеристиками материалов, полученными путем экспериментальных исследований опытных образцов.

2. Прочность разрушенной балки, модифицированной на опорах, возросла на 16–18 % по сравнению с разрушенной балкой.

3. Полимерные композиционные материалы возможно использовать для увеличения несущей способности деревянных балочных конструкций, если потеря несущей способности составляет не более 35 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Карельский А.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Требования к надежности и безопасной эксплуатации большепролетных клееных деревянных конструкций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 3. С. 143–147.

Karelskiy A.V., Labudin B.V., Melekhov V.I. Reliability Requirements for the Large-Span Laminated Wood Structural Elements. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2012, no. 3, pp. 143–147. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/d47/pawx2.pdf>

2. Лабудин Б.В., Морозов В.С., Орлов А.О. Компьютерный расчет напряженно-деформированного состояния узлового соединения // Вестн. ПГТУ. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 3. С. 45–51.

Labudin B.V., Morozov V.S., Orlov A.O. Computer Calculation of Stress-Strain State of Node Connection. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*, 2019, no. 3, pp. 45–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2019.3.45>

3. Матвеев Р.П., Лабудин Б.В., Морозов В.С., Орлов А.О. Численный анализ прочности и жесткости биомеханической системы «кость – аппарат» // Экология человека. 2017. Т. 24, № 4. С. 58–64.

Matveev R.P., Labudin B.V., Morozov V.S., Orlov A.O. Numerical Analysis of Strength and Rigidity of the Biomechanical System “Bone-Apparatus”. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 58–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2017-4-58-64>

4. Рощина С.И., Лукин М.В., Лукина А.В., Лисятников М.С. Повышение эксплуатационных свойств древесины, ослабленной биоповреждением, путем модификации клеевой композицией на основе эпоксидной смолы // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2014. № 4. С. 182–184.

Roshchina S.I., Lukin M.V., Lukina A.V., Lisyatnikov M.S. Increased Performance Properties Wood Weakened Biodeterioration by Modifying the Adhesive Composition Based on an Epoxy Resin. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2014, no. 4, pp. 182–184. (In Russ.).

5. Рощина С.И., Лукин М.В., Лукина А.В., Лисятников М.С. Восстановление деревянной балки импрегнированием полимерной композицией на основе эпоксидной смолы // Лесотехн. журн. 2015. № 3(19). С. 183–190.

Roshchina S.I., Lukin M.V., Lukin A.V., Lisyatnikov M.S. Recovery Wooden Beams Impregnating Polymer Composition Based on Epoxy Resins. *Forestry Engineering Journal*, 2015, no. 3(19), pp. 183–190. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/14167>

6. Рощина С.И., Смирнов Е.А., Лукин М.В., Лукина А.В., Грибанов А.С. Восстановление деструктивных участков опорных зон деревянных балок путем пропитки полимерным раствором // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2014. № 5. С. 293–296.

Roshchina S.I., Smirnov E.A., Lukin M.V., Lukin A.V., Griбанov A.S. Destructive Recovery Phase Reference Zone Wooden Beams by Impregnation of the Polymer Solution. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2014, no. 5, pp. 293–296. (In Russ.).

7. Adamu M., Rahman Md. R., Hamdan S., Khusairy M., Bakri B., Yusof F.A.B.M. Impact of Polyvinyl Alcohol/Acrylonitrile on Bamboo Nanocomposite and Optimization of Mechanical Performance by Response Surface Methodology. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 258, art. 119693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119693>

8. Borri A., Corradi M., Speranzini E. Reinforcement of Wood with Natural Fibers. *Composites Part B: Engineering*, 2013, vol. 53, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.039>

9. Chernova T.P., Filippov V.V., Labudin B.V., Melekhov V.I. Stress-Strain State of the Elements of a Timber-to-Timber Joint Connected by Inclined Screwed-In Rods. *Environmen-*

tal and Construction Engineering: Reality and the Future. Ed. by S.V. Klyuev, A.V. Klyuev. Springer, 2021, pp. 101–107. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_14

10. D'Ambrisia A., Focacci F., Luciano R. Experimental Investigation on Flexural Behavior of Timber Beams Repaired with CFRP Plates. *Composite Structures*, 2014, vol. 108, pp. 720–728. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.005>

11. Dietsch P., Kreuzinger H. Dynamic Effects in Reinforced Beams at Brittle Failure – Evaluated for Timber Members. *Engineering Structures*, 2020, vol. 209, art. 110018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110018>

12. Dietsch P., Winter S. Structural Failure in Large-Span Timber Structures: A Comprehensive Analysis of 230 Cases. *Structural Safety*, 2018, vol. 71, pp. 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.11.004>

13. Esmailpour A., Majidi R., Taghiyari H.R., Ganjkhani M., Mohseni Armaki S.M., Papadopoulou A.N. Improving Fire Retardancy of Beech Wood by Graphene. *Polymers*, 2020, vol. 12(2), art. 303. <https://doi.org/10.3390/polym12020303>

14. Franke S., Franke B., Harte A.M. Failure Modes and Reinforcement Techniques for Timber Beams – State of the Art. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 97, pp. 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021>

15. Frese M., Blaß H.J. Statistics of Damages to Timber Structures in Germany. *Engineering Structures*, 2011, vol. 33, iss. 11, pp. 2969–2977. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.030>

16. Gentile C., Svecova D., Rizkalla S.H. Timber Beams Strengthened with GFRP Bars: Development and Applications. *Journal of Composites for Construction*, 2002, vol. 6, iss. 1, art. 11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:1(11))

17. Khelifa M., Celzard A. Numerical Analysis of Flexural Strengthening of Timber Beams Reinforced with CFRP Strips. *Composite Structures*, 2014, vol. 111, pp. 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.011>

18. Kim Y.J., Harries K.A. Modeling of Timber Beams Strengthened with Various CFRP Composites. *Engineering Structures*, 2010, vol. 32, iss. 10, pp. 3225–3234. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.06.011>

19. Kolya H., Kang C.-W. Polyvinyl Acetate/Reduced Graphene Oxide-Poly (Diallyl Dimethylammonium Chloride) Composite Coated Wood Surface Reveals Improved Hydrophobicity. *Progress in Organic Coatings*, 2021, vol. 156, art. 106253. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106253>

20. Koshcheev A.A., Roshchina S.I., Aleksiiyevets V., Labudin B.V. Local Deformation and Strength Characteristics of S-Shaped Reinforcement in Wood. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, art. 012060. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012060>

21. Koshcheev A.A., Roshchina S.I., Naichuk A.Y., Vatin N.I. The Effect of Eccentricity on the Strength Characteristics of Glued Rods Made of Steel Cable Reinforcement in Solid Wood. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, art. 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012059>

22. Kreher K., Natterer J., Natterer J. Timber-Glass-Composite Girders for a Hotel in Switzerland. *Structural Engineering International*, 2004, vol. 14, iss. 2, pp. 149–168. <https://doi.org/10.2749/101686604777963964>

23. Lukin M., Prusov E., Roshchina S., Karelina M., Vatin N. Multi-Span Composite Timber Beams with Rational Steel Reinforcements. *Buildings*, 2021, vol. 11, iss. 2, art. 46. <https://doi.org/10.3390/buildings11020046>

24. Lukin M., Sergeev M., Lisyatnikov M. Non Split Wooden Beam Reinforced with Composite Reinforcement. *Proceedings of EECE 2020*. Cham, Springer, 2021, pp. 115–123. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_12

25. Lukina A., Roshchina S., Griбанov A. Method for Restoring Destructed Wooden Structures with Polymer Composites. *Proceedings of EECE 2020*. Cham, Springer, 2021, pp. 464–474. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_45
26. Marzi T. Nanostructured Materials for Protection and Reinforcement of Timber Structures: A Review and Future Challenges. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 97, pp. 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.016>
27. Nowak T., Jasiеnko J., Kotwica E., Krzosek S. Strength Enhancement of Timber Beams Using Steel Plates – Review and Experimental Tests. *Drewno*, 2016, vol. 59, no. 196, pp. 75–90. <http://dx.doi.org/10.12841/wood.1644-3985.150.06>
28. Orlando N., Taddia Yu., Benvenuti E., Pizzo B., Alessandri C. End-Repair of Timber Beams with Laterally-Loaded Glued-In Rods: Experimental Trials and Failure Prediction through Modelling. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 195, pp. 623–637. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.045>
29. Papadopoulos A.N., Bikiaris D.N., Mitropoulos A.C., Kyzas G.Z. Nanomaterials and Chemical Modifications for Enhanced Key Wood Properties: A Review. *Nanomaterials*, 2019, vol. 9, iss. 4, art. 607. <https://doi.org/10.3390/nano9040607>
30. Raftery G.M., Harte A.M. Low-Grade Glued Laminated Timber Reinforced with FRP Plate. *Composites Part B: Engineering*, 2011, vol. 42, iss. 4, pp. 724–735. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.029>
31. Raftery G.M., Whelanb C. Low-Grade Glued Laminated Timber Beams Reinforced Using Improved Arrangements of Bonded-In GFRP Rods. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 52, pp. 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.044>
32. Sergeev M.S., Griбанov A.S., Roschina S.I. The Stress Strain State of Composite Multi-Span Beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 753, art. 032068. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032068>
33. Sergeev M., Rimshin V., Lukin M., Zdralovic N. Multi-Span Composite Beam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, art. 012058. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012058>
34. Stupnicki J. Analysis of the Behavior of Wood under External Load, Based on a Study of the Cell Structure. *Acta Polytechnica Scandinavica Civil Engineering and Building Construction Series*, 1962, vol. 53. 19 p.
35. Teng T.-J., Mat Arip M.N., Sudesh K., Nemoikina A., Jalaludin Z., Ng E.-P., Lee H.-L. Conventional Technology and Nanotechnology in Wood Preservation: A Review. *BioResources*, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 9220–9252. <https://doi.org/10.15376/biores.13.4.Teng>
36. Vlad-Cristea M., Riedl B., Blanchet P., Jimenez-Pique E. Nanocharacterization Techniques for Investigating the Durability of Wood Coatings. *European Polymer Journal*, 2012, vol. 48, iss. 3, pp. 441–453. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.12.002>
37. Yahyaеi-Moayyed M., Taheri F. Experimental and Computational Investigations into Creep Response of AFRP Reinforced Timber Beams. *Composite Structures*, 2011, vol. 93, iss. 2, pp. 616–628. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.08.017>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article



Научная статья

УДК 630*86(045)

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-179-190

Кинетические закономерности процесса водно-щелочного гидролиза березовой коры в СВЧ-поле

Е.Н. Коптелова, канд. техн. наук, доц.; Researcher ID: [AAI-4768-2020](https://orcid.org/0000-0002-0500-0582),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0500-0582>

Н.А. Кутакова[✉], канд. техн. наук, доц.; Researcher ID: [T-1150-2019](https://orcid.org/0000-0001-8195-2115),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8195-2115>

С.И. Третьяков, канд. техн. наук, проф.; Researcher ID: [S-2192-2019](https://orcid.org/0000-0003-1783-5349),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1783-5349>

А.В. Фалева, мл. науч. сотр.; Researcher ID: [AAZ-1879-2020](https://orcid.org/0000-0002-8565-6871),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8565-6871>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; elen-koptelova@yandex.ru, n.kutakova@narfu.ru[✉], s.tretyakov@narfu.ru, a.bezumova@narfu.ru

Поступила в редакцию 30.10.20 / Одобрена после рецензирования 29.12.20 / Принята к печати 11.01.21

Аннотация. Березовая кора состоит из бересты (корки) и луба. Береста содержит до 50 % экстрактивных веществ и служит сырьем для получения ценных биологически активных веществ, в том числе бетулина. Отличительной чертой структуры бересты является наличие поперечно-сшитого полимера – суберина. Его мономеры – субериновые кислоты – нашли применение в производстве смазок и масел, инсектицидов, фунгицидов, полимеров, полиэфиров, покрытий и др. Общепринятым способом выделения солей субериновых кислот из бересты является ее исчерпывающий гидролиз водным или водно-спиртовым раствором гидроксида калия или натрия. Нами предложена активация сырья в процессе гидролиза путем использования электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ-гидролиз). Извлечение суберина из бересты – одновременно химический и массообменный процесс. Образующиеся при гидролизе соли субериновых кислот диффундируют к поверхности частиц бересты и переходят в гидролизат. Лимитирующей стадией массообмена при гидролизе бересты становится внутренняя диффузия в порах (массопроводность). Анизотропия структуры бересты затрудняет математическое описание кинетики массопереноса в диффузионном процессе. Процесс внутренней диффузии при СВЧ-гидролизе характеризуется регулярным режимом начиная с 4-й минуты. Установлены кинетические закономерности данного процесса, определена эффективность диффузии в тангенциальном и продольном направлениях. С увеличением размеров частиц бересты и по длине (тангенциальное направление), и по ширине (продольное направление) происходит увеличение скорости процесса гидролиза и степени извлечения суберина. Определены коэффициенты внутренней диффузии при СВЧ-гидролизе коры. Наибольшее значение получено для фракции с размером частиц 3...4,5 мм (береста), наименьшее – для фракции менее 1 мм (луб). Показано,

что для повышения выхода суберина из березовой коры после ее измельчения следует отделять мелкую фракцию – луб, бересту важно резать вдоль волокна.

Ключевые слова: березовая кора, береста, суберин, СВЧ-поле, водно-щелочной гидролиз, коэффициент диффузии

Для цитирования: Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И., Фалева А.В. Кинетические закономерности процесса водно-щелочного гидролиза березовой коры в СВЧ-поле // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 179–190. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-179-190>

Original article

Kinetics of Water-Alkaline Hydrolysis of Birch Bark in a Microwave Field

Elena N. Koptelova, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAI-4768-2020](https://orcid.org/0000-0002-0500-0582), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0500-0582>

Natal'ya A. Kutakova[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [T-1150-2019](https://orcid.org/0000-0001-8195-2115), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8195-2115>

Sergey I. Tret'yakov, Candidate of Engineering, Prof.; *ResearcherID: [S-2192-2019](https://orcid.org/0000-0003-1783-5349),*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1783-5349>

Anna V. Faleva, Junior Research Scientist; *ResearcherID: [AAZ-1879-2020](https://orcid.org/0000-0002-8565-6871),*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8565-6871>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; elen-koptelova@yandex.ru, n.kutakova@narfu.ru[✉], s.tret'yakov@narfu.ru, a.bezumova@narfu.ru

Received on October 30, 2020 / Approved after reviewing on December 29, 2020 / Accepted on January 11, 2021

Abstract. Birch bark consists of silver bark and bast. Silver bark contains up to 50 % of extractives and serves as a raw material for obtaining valuable biologically active substances (BAS), including betulin. A distinctive feature of the birch bark structure is a cross-linked polymer, suberin. Its monomers are suberic acids. They have found use in the production of lubricants, oils, insecticides, fungicides, polymers, polyesters, coatings, etc. A common method for extracting suberic acid salts from silver bark is exhaustive hydrolysis with an aqueous or water-alcohol solution of alkali (NaOH or KOH). We have proposed the activation of raw materials during hydrolysis by using an ultrahigh-frequency electromagnetic field (microwave hydrolysis). Isolation of suberin from silver bark is both a chemical and mass transfer process. Salts that are formed during hydrolysis of suberic acids diffuse to the surface of silver bark particles and pass into the hydrolysate. The limiting stage of mass transfer during birch bark hydrolysis is internal diffusion in the pores (mass conductivity). The anisotropy of the silver bark structure complicates the mathematical description of the mass transfer kinetics in the diffusion process. The process of internal diffusion during microwave hydrolysis is characterized by a steady regime starting from the 4th minute. The kinetics of this process and the effectiveness of diffusion in the tangential and longitudinal directions were determined. As the size of birch bark particles increases in both length (tangential direction) and width (longitudinal direction), the rate of the hydrolysis process and the degree of suberin isolation increase. Internal diffusion coefficients during microwave bark hydrolysis were determined. The highest value was obtained for fractions with a particle size of 3–4.5 mm (silver bark); the lowest – for fractions less than 1 mm (bast). The article shows that the small fraction (bast)



should be separated and silver bark should be cut along the fiber in order to increase the yield of suberin after birch bark grinding.

Keywords: birch bark, silver bark, suberin, microwave field, water-alkaline hydrolysis, diffusion coefficient

For citation: Koptelova E.N., Kutakova N.A., Tret'yakov S.I., Faleva A.V. Kinetics of Water-Alkaline Hydrolysis of Birch Bark in a Microwave Field. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 179–190. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-179-190>

Введение

Березовая кора имеет 2 слоя: наружный – корка (береста), внутренний – луб. По своему химическому составу они значительно отличаются друг от друга. Береста представляет наибольший интерес для химической переработки, так как содержит до 50 % экстрактивных веществ [3] и служит сырьем для получения ценных продуктов и биологически активных веществ, в том числе бетулина.

Отличительной чертой структуры бересты является наличие полимера суберина, содержание которого в ней составляет 20...30 % [18]. Суберин представляет собой поперечно-сшитый полифенол, в котором алифатические, или так называемые субериновые, кислоты связаны с ароматическими полифенолами [19, 20]. Основная функция суберина – защита тканей от потери воды, минеральных и питательных веществ [16, 22, 31]: он пропитывает клеточные оболочки, в результате чего происходит их опробкование. В качестве гидрофобного барьера суберин важен для поддержания устойчивости к патогенам [28].

Субериновые кислоты нашли применение в производстве смазок и масел, инсектицидов, фунгицидов и других продуктов [27]. Представляют интерес для изготовления средств защиты растений [30], пленкообразующих средств и покрытий [13, 14], пенополиуретана и древесно-стружечных плит с высокой прочностью [29], средств защиты кожи [21], служат связующими при получении плитных материалов [12]. Данные мономеры позволяют синтезировать уникальные функциональные полиэфиры, в том числе биоразлагаемые [32]. Высокая термостойкость субериновых кислот вместе с олигомерно-полимерной природой открывают новые перспективы использования суберина в качестве макромономера при разработке полимерных материалов на биологической основе. Это способствует повышению ценности остатков лесозаготовки, богатых суберином [19]. Субериновые кислоты березовой коры по аналогии с кислотами из коры черной ольхи, вероятно, могут обладать антибактериальной или антигрибковой активностью [3].

Извлечение суберина из бересты является одновременно химическим и массообменным процессом. Исследованиями [4, 8, 9] показано, что лимитирующей стадией массообмена в бересте и других растительных материалах становится внутренняя диффузия в порах (массопроводность). Максимальная массопроводность наблюдается в поперечном направлении, минимальная – в радиальном. Анизотропия бересты затрудняет математическое описание кинетики массопереноса в диффузионных процессах (экстракция, сушка). Общепринятый способ выделения солей субериновых кислот из бересты – ее исчерпыва-

ющий гидролиз водным или водно-спиртовым раствором гидроксида калия или натрия последовательным (после извлечения бетулина) [11] или совмещенным способом [1]. Деполимеризация в среде органических растворителей, включая алифатические спирты, протекает полнее [23], чем при использовании других растворителей.

С целью интенсификации процессов химической переработки древесного сырья применяют различные активирующие воздействия. Так, для извлечения бетулина предложено активировать бересту в условиях неизобарного парокрекинга [6] или ударно-акустическими импульсами, щелочной гидролиз и экстракцию бетулина спиртом проводить одновременно [10]; для различных растительных материалов – применять ультразвуковое воздействие или сверхкритическую экстракцию диоксидом углерода [24] и другими флюидами [17]. Однако данные способы усложняют технологию и повышают энергоемкость процесса.

Перспективным методом активации сырья является использование электромагнитного поля сверхвысоких частот (ЭМП СВЧ). В последние годы проявляется огромный интерес к интенсификации извлечения компонентов из растительного сырья при помощи ЭМП СВЧ [25, 26]. Ранее нами установлено [2], что обработка бересты посредством воздействия на нее волнами СВЧ-поля в 2 раза сокращает продолжительность процесса водно-щелочного гидролиза при извлечении суберина по сравнению с традиционными способами.

Изучение литературных данных позволило выявить, что математический алгоритм процесса водно-щелочного гидролиза березовой коры фактически не разработан. Не установлены кинетические закономерности данного процесса, не определена эффективность диффузии веществ через различные поверхности бересты (в тангенциальном и продольном направлениях).

Цель исследования – изучение кинетических закономерностей процесса водно-щелочного гидролиза бересты при получении суберина с использованием СВЧ-поля, определение коэффициентов внутренней диффузии при СВЧ-гидролизе.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служила техническая березовая кора АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат», отобранная с линии окорки балансов. Высушенную кору измельчали на дробилке истирающего действия и подвергали фракционированию на ситах, в ходе которого выделили фракции, состоящие преимущественно из бересты (3...4,5 мм) и луба (менее 1 мм).

Влажность и общую зольность коры определяли по методике, описанной в [7]. Влажность бересты составила 2,5 %, луба – 6,5 %; зольность бересты – 1,35 %, луба – 1,87 %.

Для изучения кинетических закономерностей СВЧ-гидролиза готовили методом ручной резки модельные образцы бересты с фиксированными размерами в тангенциальном и продольном направлениях: 2,5 × 2,5; 2,5 × 5,0; 2,5 × 10,0 и 5,0 × 5,0 мм. Для получения данных, близких к производственным, измельчали сухую березовую кору на дробилке истирающего (луцильного) действия типа dr. Koerner, mode II.

Геометрические характеристики полученных фракций коры, измельченной на дробилке, и модельных образцов бересты ручной резки приведены в табл. 1. Эквивалентный радиус частиц рассчитывали по формуле

$$\frac{1}{R^2} = \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{(6R_2)^2} + \frac{1}{(16R_3)^2},$$

где R_1 , R_2 , R_3 – полудлина ребра частички бересты в тангенциальном, продольном и радиальном направлениях соответственно, мм.

Таблица 1

Геометрические характеристики (мм) образцов коры и бересты

Table 1

Geometric characteristics of bark and silver bark samples

Вид измельчения	Фракции коры / размеры частиц бересты*	Эквивалентный радиус
Истирающее измельчение	Менее 1	0,21
	1...2	0,24
	2...3	0,24
	3...4,5	0,24
Ручная резка	2,5 × 2,5	1,22
	2,5 × 5,0	1,23
	2,5 × 10,0	1,23
	5,0 × 5,0	2,36

*1-е число – в поперечном, 2-е – в продольном измерении.

Эквивалентный радиус частиц при истирающем измельчении существенно меньше, чем при ручной резке. Для фракций коры 1...2, 2...3 и 3...4,5 мм получены совпадающие значения. Для образцов ручной резки с одинаковыми поперечными размерами установлен один и тот же (или равный) показатель, при увеличении размеров в 2 раза он повышался в 1,9 раза.

По результатам определения фракционного состава коры наибольшими фракциями были менее 1 мм (35,4 %) (луб) и 3...4,5 мм (31,5 %) (береста); фракции 1...2 мм (19,0 %) и 2...3 мм (13,0 %) совместно составляют 1/3 часть измельченной коры. Присутствовало незначительное количество частиц размером 4,5...5 мм (1,0 % от общей массы коры).

Экстрактивные вещества выделены из приготовленных образцов этиловым спиртом при помощи установки с СВЧ-камерой на основе бытового генератора ЭМП СВЧ [5, 15]. Извлечение суберина из проэкстрагированной бересты осуществляли методом водно-щелочного гидролиза в СВЧ-камере при оптимальных условиях, установленных ранее с использованием планированного эксперимента [2]. Гидролиз проводили 5 %-м водным раствором гидроксида калия при гидромодуле 1:15.

Для исследования кинетики извлечения суберина отбирали пробы гидролизата: в начале процесса через каждые 2 мин, в конце – через каждые 3 мин. Общая продолжительность процесса составила 15 мин. Получаемые гидролизаты нейтрализовали 1 М раствором соляной кислоты до pH 4...6. Выделившийся осадок субериновых кислот отфильтровывали, промывали водой до нейтральной реакции и сушили при комнатной температуре до постоянной массы. Выход суберина рассчитывали по отношению к массе коры.

Результаты исследования и их обсуждение

Выход бетулина-сырца из измельченной сортированной коры (без мелкой фракции – луба) составил 12,4 и 16,7 % от абсолютно сухой коры (а. с. к.) для фракций 2...3 и 3...4,5 мм соответственно.

В результате водно-щелочного гидролиза проэкстрагированной коры в ЭМП СВЧ получены образцы суберина. Зависимость выхода суберина для различных фракций коры от продолжительности обработки в СВЧ-поле представлена на рис. 1.

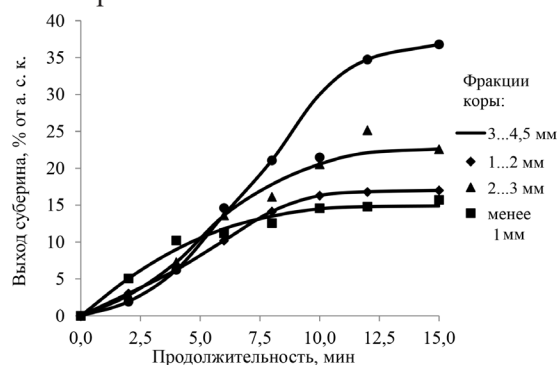


Рис. 1. Зависимость выхода суберина от продолжительности СВЧ-гидролиза для фракций коры, полученных истирающим измельчением

Fig. 1. Dependence of the suberin yield on the microwave hydrolysis duration for bark fractions obtained by abrasive grinding

При анализе зависимостей (рис. 1) обнаружено, что с увеличением размеров фракции выход суберина возрастает. Выход варьирует в интервале 15,7...36,8 % и достигает максимума (в пределах принятого диапазона продолжительности) для фракции 3...4,5 мм (береста). Для других фракций коры выход суберина оказывается на плато при продолжительности гидролиза 10...12 мин, но на меньшем уровне. Минимальный выход 15,7 % наблюдается при гидролизе коры с размером частиц менее 1 мм (луб).

Зависимость выхода суберина от продолжительности процесса СВЧ-гидролиза при различной степени измельчения бересты путем ручной резки (модельные образцы) показана на рис. 2. Выход рассчитан по отношению к абсолютно сухой бересте (а. с. б.).

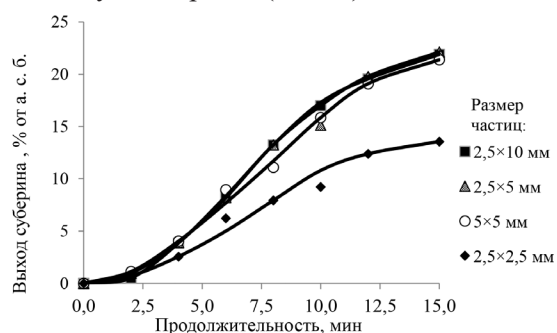


Рис. 2. Зависимость выхода суберина от продолжительности СВЧ-гидролиза при различной степени измельчения бересты (модельные образцы)

Fig. 2. Dependence of the suberin yield on the microwave hydrolysis duration at different degrees of birch bark grinding (model samples)

В опытах с модельными образцами бересты ручной резки (рис. 2) максимальный выход 22,1 % (15 мин) также достигается при гидролизе образцов наибольшего размера, однако плато не наблюдается. Выход продукта из образца бересты с наименьшими размерами стремится к стабилизации начиная с 12-й мин, но не превышает 13 %. Эти закономерности отражают способность коры березы к самосепарации в процессе измельчения: луб легко крошится и составляет основу мелких фракций, поэтому выход суберина из них значитель-

но ниже, чем из крупных фракций. Следовательно, трудоемкая операция по ручному предварительному отделению луба от бересты может быть заменена механическим сортированием измельченной сухой коры.

На представленных кинетических кривых (рис. 2) видно, что увеличение размеров частиц в продольном направлении не приводит к значительным изменениям выхода суберина (варьирование в пределах 21,4...22,1 % от а. с. б.). Однако увеличение размеров частиц в тангенциальном направлении влечет за собой резкое повышение выхода суберина (с 13,6 до 21,4 % от а. с. б.), т. е. бересту важно резать вдоль волокна.

При обработке данных по кинетике СВЧ-гидролиза исследовали зависимость степени недоизвлечения суберина (E), равной отношению остаточного содержания суберина к его исходному содержанию в коре, от продолжительности процесса по кинетическому уравнению, соответствующему регулярному режиму извлечения:

$$E = Be^{-\mu^2 Fo},$$

где B – безразмерный коэффициент, определяемый экспериментальным путем; μ – коэффициент, равный корню характеристического уравнения (для частиц, приведенных к шарообразной форме, принимающий значение π); Fo – диффузионный критерий Фурье,

$$Fo = D \frac{\tau}{R^2},$$

D – коэффициент внутренней диффузии, m^2/c ; τ – продолжительность экстракции, с; R – приведенный радиус частицы бересты, м.

Для определения коэффициента внутренней диффузии уравнение $E = Be^{-\mu^2 Fo}$ логарифмировали. На рис. 3, *a*, *б* представлены логарифмические зависимости $\ln E$ от продолжительности процесса. Графики позволяют сделать вывод о том, что линейные зависимости, соответствующие регулярному режиму процесса извлечения, наблюдаются после 4-й минуты проведения СВЧ-гидролиза, совмещенного с диффузией суберина из бересты.

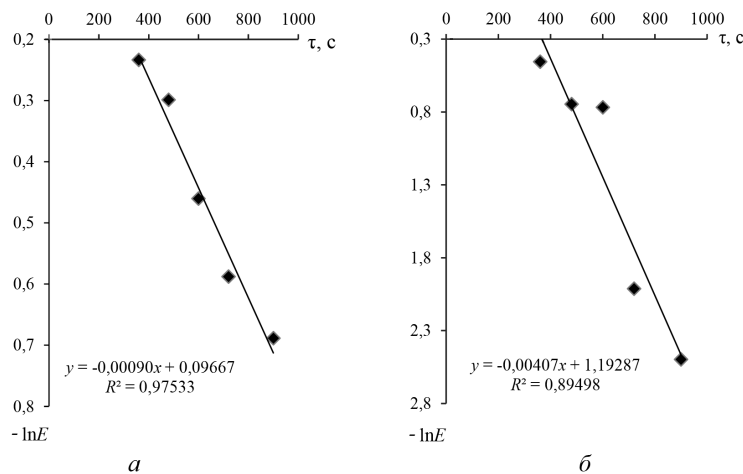


Рис. 3. Зависимость $\ln E = f(\tau)$ при извлечении суберина из:
a – модельного образца бересты ручной резки ($5,0 \times 5,0$ мм);
б – коры, измельченной на дробилке ($3...4,5$ мм)

Fig. 3. Dependence of $\ln E = f(\tau)$ when extracting suberin from:
a – a model sample of hand-cut silver bark (5.0×5.0 mm); *б* – bark
grinded in a grinder ($3-4.5$ mm)

Экстраполяцией прямой линии определяли безразмерный коэффициент B , а по тангенсу угла наклона прямых ($\operatorname{tg}\alpha$) рассчитывали коэффициент внутренней диффузии

$$D = \frac{R^2 \operatorname{tg}\alpha}{\pi^2}.$$

Расчетные значения коэффициентов внутренней диффузии и критерия Фурье для модельных образцов бересты ручной резки и коры, измельченной на дробилке, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние вида измельчения и размеров березовой коры на коэффициент внутренней диффузии и критерий Фурье

Table 2

Influence of the grinding method and the size of birch bark on the internal diffusion coefficient and the Fourier criterion

Вид измельчения	Фракции коры / размеры частиц бересты, мм	B	$\operatorname{tg}\alpha \cdot 10^3$	$D \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}$	$Fo \cdot 10^3$
Ручная резка	2,5 × 2,5	1,006	−0,47	0,709	43
	2,5 × 5,0	1,117	−0,94	1,441	86
	2,5 × 10,0	1,078	−0,90	1,380	82
	5,0 × 5,0	1,101	−0,90	5,079	82
Истирающее действие	Менее 1	0,819	−0,26	0,012	24
	1...2	0,820	−0,38	0,022	35
	2...3	0,885	−0,87	0,050	79
	3...4,5	3,297	−4,07	0,238	371

На рис. 4 приведены экспериментальные (маркер) и расчетные (линия) данные по кинетике процесса для измельченной отсортированной коры (фракция 3...4,5 мм). Предложенная экспоненциальная модель достаточно хорошо ($R^2 = 0,85$) описывает внутреннюю диффузию и кинетику в целом.

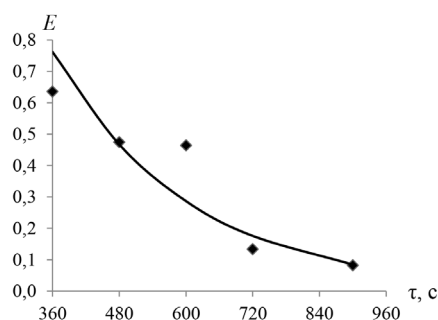


Рис. 4. Зависимость степени недоизвлечения суберина от продолжительности процесса гидролиза для коры, измельченной на дробилке (3...4,5 мм)

Fig. 4. Dependence of the degree of suberin under-recovery on the hydrolysis duration for bark grinded in a grinder (3–4.5 mm)

При водно-щелочном гидролизе модельных образцов бересты в ЭМП СВЧ наибольший коэффициент внутренней диффузии обнаружен у образца размером 5 × 5 мм, наименьший – у образца 2,5 × 2,5 мм. При увеличении размера коры в поперечном направлении наблюдается значительное повышение коэффициента диффузии. Изменения в продольном направлении на коэффициенте диффузии практически не отражаются. При гидролизе березовой коры, измельченной на дробилке, наибольший коэффициент диффузии зафиксирован у фракции 3...4,5 мм, наименьший – у фракции менее 1 мм.

Анатомическое строение березовой коры имеет значение при выборе способа измельчения ее для химической переработки. Концентрация суберина в гидролизате при использовании сырья поперечной резки относительно ствола больше, чем при продольной. С увеличением размеров бересты и по длине (тангенциальное направление), и по ширине (продольное направление) растут скорость процесса гидролиза и степень извлечения суберина.

Малые значения критерия Фурье говорят о высокой скорости процесса при воздействии СВЧ-поля. Увеличение критерия происходит с ростом размеров частиц коры и соответствует увеличению коэффициента внутренней диффузии.

Заключение

Показана принципиальная возможность комплексной химической переработки технической березовой коры – отхода целлюлозно-бумажного производства – с получением бетулина и суберина. Извлечение компонентов осуществлено последовательно в электромагнитном поле сверхвысоких частот из измельченной коры. Трудоемкая операция по ручному предварительному отделению луба от бересты заменена механическим сортированием измельченной сухой коры. При обработке коры путем последовательной спиртовой экстракции и гидролиза в СВЧ-поле достигнуты максимальные выходы бетулина-сырца и суберина – 16,7 и 36,8 % от массы коры соответственно.

Установлены кинетические закономерности водно-щелочного СВЧ-гидролиза: для достижения максимального выхода суберина (более 36 %) продолжительность обработки крупной фракции коры должна быть не менее 15 мин. Определены коэффициенты внутренней диффузии: наибольшее значение ($0,238 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$) установлено для фракции с размером частиц 3...4,5 мм (береста), наименьшее ($0,012 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$) – для фракции менее 1 мм (луб). Рассчитанные значения критерия Фурье для процесса СВЧ-гидролиза свидетельствуют о высокой скорости извлечения суберина, в особенности для крупных фракций коры, и соответствуют тенденции роста коэффициента внутренней диффузии по мере увеличения размеров частиц коры, измельченной на дробилке.

Предложена экспоненциальная модель, достаточно хорошо описывающая внутреннюю диффузию в анизотропном материале (коре) и кинетику извлечения из него суберина. Показано существенное различие поведения составных частей коры в ходе СВЧ-обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А.с. 382657 СССР, МКИ¹ С 08h 5/04. Способ выделения бетулина и суберина: № 1472003/23-4: заявл. 14.08.1970: опубл. 23.05.1973 / Т.И. Федорищев, В.Г. Калайков. Fedorishchev T.I., Kalaykov V.G. *Method for Isolation of Betulin and Suberin*. Certificate of Authorship USSR, no. SU 382657 A1, 1973. (In Russ.).
2. Безумова А.В., Третьяков С.И., Кутакова Н.А., Коптелова Е.Н. Извлечение субериновых кислот из бересты при воздействии СВЧ-поля // *Химия растит. сырья*. 2018. № 1. С. 21–28.
- Bezumova A.V., Tret'iakov S.I., Kutakova N.A., Koptelova E.N. Extracting Suberin Acids from Birch Bark when Exposed to a Microwave Field. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* =

Chemistry of Plant Raw Materials, 2018, no. 1, pp. 21–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018012560>

3. Кислицын А.Н. Экстрактивные вещества бересты: выделение, состав, свойства, применение. Обзор // Химия древесины. 1994. № 3. С. 3–28.

Kislitsyn A.N. Extractive Substances of Birch Bark: Isolation, Composition, Properties and Application. Review. *Khimiya drevesiny*, 1994, no. 3, pp. 3–28. (In Russ.).

4. Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И. Исследование кинетики массопереноса в процессе экстрагирования бересты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 4. С. 119–128.

Koptelova E.N., Kutakova N.A., Tretyakov S.I. Study of Mass Transfer Kinetics during Birch Bark Extraction. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2013, no. 4, pp. 119–128. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/22b/x5.pdf>

5. Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И. Извлечение экстрактивных веществ и бетулина из бересты при воздействии СВЧ-поля // Химия растит. сырья. 2013. № 4. С. 159–164.

Koptelova E.N., Kutakova N.A., Tretyakov S.I. Removing the Extractives and Betulin from Birch Bark Exposed Microwave Field. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of Plant Raw Materials, 2013, no. 4, pp. 159–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1304159>

6. Кузнецов Б.Н., Левданский В.А., Еськин А.П., Полежаева Н.И. Выделение бетулина и суберина из коры березы, активированной в условиях «взрывного автогидролиза» // Химия растит. сырья. 1998. № 1. С. 5–9.

Kuznetsov B.N., Levdanskiy V.A., Es'kin A.P., Polezhayeva N.I. Isolation of Betulin and Suberin from Birch Bark Activated in Conditions of “Explosive Autohydrolysis”. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of Plant Raw Materials, 1998, no. 1, pp. 5–9. (In Russ.).

7. Кутакова Н.А., Богданович Н.И., Селянина С.Б., Коптелова Е.Н., Коровкина Н.В. Лабораторный практикум по технологии биологически активных веществ и углеродных адсорбентов: в 2 ч. Ч. 2. Анализ БАВ. Архангельск: САФУ, 2015. 114 с.

Kutakova N.A., Bogdanovich N.I., Selyanina S.B., Koptelova E.N., Korovkina N.V. *Laboratory Workshop on the Technology of Biologically Active Substances and Carbon Adsorbents: 2 Parts. Part 2. Analysis of BAS*. Arkhangelsk, NarFU Publ., 2015. 114 p. (In Russ.).

8. Макаревич Н.А., Третьяков С.И., Богданович Н.И. Кинетическая модель массопереноса на межфазных границах с участием компонентов растительного сырья // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2019. Т. 55, № 6. С. 601–609.

Makarevich N.A., Tretyakov S.I., Bogdanovich N.I. Kinetic Model of Mass Transfer at Interfaces with Components of Plant Products. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov* = Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 601–609. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0044185619050164>

9. Макаревич Н.А., Богданович Н.И., Третьяков С.И., Коптелова Е.Н. Кинетическая модель межфазовых процессов с участием компонентов растительного сырья // Химия растит. сырья. 2014. № 4. С. 251–262.

Makarevich N.A., Bogdanovich N.I., Tretyakov S.I., Koptelova E.N. Kinetic Model of Interphase Processes with Participation of Components of Plant Raw Materials. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of Plant Raw Materials, 2014, no. 4, pp. 251–262. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.201404208>

10. Патент 2264411 РФ, С1, МПК С07J 53/00 (2006.01), С07J 63/00 (2006.01). Способ получения бетулина: № 2004122661/04: заявл. 23.07.2004; опубл. 20.11.2005 / С.А. Кузнецова, Б.Н. Кузнецов, А.Г. Михайлов, В.А. Левданский.

Kuznetsova S.A., Kuznetsov B.N., Mihajlov A.G., Levdanskiy V.A. *Method for Production of Betulin*. Patent RF no. RU 2 264 411 C1, 2005. (In Russ.).

11. Патент 2618892 РФ, С1 А61К 36/185(2006.01), В01D 11/02(2006.01), А61К 129/00(2006.01). Способ комплексной переработки коры березы: № 2016120506: заявл. 25.05.2016: опубл. 11.05.2017 / Б.Н. Кузнецов, И.Г. Судакова, С.А. Кузнецова, Л.И. Гришечко, Г.П. Скворцова, Е.В. Веприкова, В.А. Левданский.

Kuznetsov B.N., Sudaikova I.G., Kuznetsova S.A., Grischechko L.I., Skvortsova G.P., Veprikova E.V., Levdanskiy V.A. *Method for Complex Processing of Birch Bark*. Patent RF no. RU 2 618 892 C1, 2017. (In Russ.).

12. Судакова И.Г., Гарынцева Н.В., Кузнецов Б.Н. Получение древесных плитных материалов с использованием связующих на основе суберина березовой коры // Химия растит. сырья. 2011. № 3. С. 65–68.

Sudaikova I.G., Garyntseva N.V., Kuznetsov B.N. Production of Wood Fiber Boards with the Use of Birch Bark Suberin-Derived Binding Agents. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2011, no. 3, pp. 65–68. (In Russ.).

13. Судакова И.Г., Иванов И.П., Иванченко Н.М., Кузнецов Б.Н. Защитные составы для древесины на основе суберина коры березы // Химия растит. сырья. 2005. № 1. С. 59–63.

Sudaikova I.G., Ivanov I.P., Ivanchenko N.M., Kuznetsov B.N. Protective Compositions for Wood Based on Birch Bark Suberin. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2005, no. 1, pp. 59–63. (In Russ.).

14. Судакова И.Г., Кузнецов Б.Н., Иванов И.П., Иванченко Н.М. Получение пленкообразующих материалов из суберина коры березы повислой // Химия растит. сырья. 2004. № 1. С. 31–34.

Sudaikova I.G., Kuznetsov B.N., Ivanov I.P., Ivanchenko N.M. Film-Forming Materials Production from Birch Bark Suberin. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2004, no. 1, pp. 31–34. (In Russ.).

15. Третьяков С.И., Коптелова Е.Н., Кутакова Н.А., Владимирова Т.М., Богданович Н.И. Бетулин: получение, применение, контроль качества: моногр. Архангельск: САФУ, 2015. 180 с.

Tret'yakov S.I., Koptelova E.N., Kutakova N.A., Vladimirova T.M., Bogdanovich N.I. *Betulin: Receiving, Use and Quality Control*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2015. 180 p. (In Russ.).

16. Черняева Г.Н., Долгодворова С.Я., Бондаренко С.М. Экстрактивные вещества березы. Красноярск: ИЛиД, 1986. 123 с.

Chernyaeva G.N., Dolgodvorova S.Ya., Bondarenko S.M. *Extractive Substances of Birch*. Krasnoyarsk, ILiD Publ., 1986. 123 p. (In Russ.).

17. Armbruste M., Mönckedieck M., Scherließ R., Daniels R., Wahl M.A. Birch Bark Dry Extract by Supercritical Fluid Technology: Extract Characterisation and Use for Stabilisation of Semisolid Systems. *Applied Sciences*, 2017, vol. 7, iss. 3, art. 292. <https://doi.org/10.3390/app7030292>

18. Ekman R. The Suberin Monomers and Triterpenoids from the Outer Bark of *Betula verrucosa* Ehrh. *Holzforschung*, 1983, vol. 37, iss. 4, pp. 205–211. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1983.37.4.205>

19. Ferreira R., Garcia H., Sousa A.F., Freire C.S.R., Silvestre A.J.D., Rebelo L.P.N., Pereira C.S. Isolation of Suberin from Birch Outer Bark and Cork Using Ionic Liquids: A New Source of Macromonomers. *Industrial Crops and Products*, 2013, vol. 44, pp. 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.10.002>

20. Gandini A., Neto C.P., Silvestre A.J.D. Suberin: A Promising Renewable Resource for Novel Macromolecular Materials. *Progress in Polymer Science*, 2006, vol. 31, iss. 10, pp. 878–892. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.07.004>

21. Hamaoka S., Suzuki A., Hara M., Nishio H., Otsuka F., Uchida Y. Human Epidermal Glucosylceramides are Major Precursors of Stratum Corneum Ceramides. *Journal*

of *Investigative Dermatology*, 2002, vol. 119, iss. 2, pp. 416–423. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1747.2002.01836.x>

22. Kolattukudy P.E. Biopolyester Membranes of Plants: Cutin and Suberin. *Science*, 1980, vol. 208, no. 4447, pp. 990–1000. <https://doi.org/10.1126/science.208.4447.990>

23. Krasutsky P.A., Carlson R.M., Kolomitsyn I.V. *Isolation of Natural Products from Birch Bark*. Patent US no. US 6,768,016 B2, 2004.

24. Krasutsky P.A., Carlson R.M., Nesterenko V.V., Kolomitsyn I.V., Edwardson C.F. *Birch Bark Processing and the Isolation of Natural Products from Birch Bark*. Patent US no. US 2005/O158414 A1, 2005.

25. Mandal V., Mohan Y., Hemalatha S. Microwave Assisted Extraction – an Innovative and Promising Extraction Tool for Medicinal Plant Research. *Pharmacognosy Reviews*, 2007, vol. 1, iss. 1, pp. 7–18.

26. *Microwave-Assisted Extraction for Bioactive Compounds*. Ed. by F. Chemat, G. Cravotto. New York, Springer, 2013. 238 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4830-3>

27. Pinto P.C.R.O., Souza A.F., Silvestre A.J.D., Neto C.P., Gandini A., Eckerman C., Holmbom B. *Quercus suber* and *Betula pendula* Outer Barks as Renewable Sources of Oleochemicals: A Comparative Study. *Industrial Crops and Products*, 2009, vol. 29, iss. 1, pp. 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.04.015>

28. Pollard M., Beisson F., Li Y., Ohlrogge J.B. Building Lipid Barriers: Biosynthesis of Cutin and Suberin. *Trends in Plant Science*, 2008, vol. 13, iss. 5, pp. 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.03.003>

29. Rižikovs J., Zandersons J., Paže A., Tardenaka A., Spince B. Isolation of Suberinic Acids from Extracted Outer Birch Bark Depending on the Application Purposes. *Baltic Forestry*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 98–105.

30. Schweizer P., Felix G., Buchala A., Müller C., Métraux J.-P. Perception of Free Cutin Monomers by Plant Cells. *The Plant Journal*, 1996, vol. 10, iss. 2, pp. 331–341. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3113X.1996.10020331.x>

31. Von Wettstein-Knowles P.M. Waxes, Cutin, and Suberin. *Lipid Metabolism in Plants*. Ed. by T.S. Moore. CRC Press, 2018, pp. 127–166. <https://doi.org/10.1201/9781351074070-5>

32. Yang Y., Lu W., Zhang X., Xie W., Cai M., Gross R.A. Two-Step Biocatalytic Route to Biobased Functional Polyesters from ω -Carboxy Fatty Acids and Diols. *Biomacromolecules*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 259–268. <https://doi.org/10.1021/bm901112m>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

Научная статья

УДК 661.728

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-191-202

Гидролиз целлюлозы с использованием газоздушных смесей хлористого водорода

С.Д. Пименов[✉], аспирант; ResearcherID: [AAC-9435-2020](https://orcid.org/0000-0001-6042-0021),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6042-0021>

Г.В. Мзиков, инж.-технолог; ResearcherID: [AAD-5436-2020](https://orcid.org/0000-0003-3610-316X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3610-316X>

А.И. Сизов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAI-2030-2020](https://orcid.org/0000-0001-9412-5557),


ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-5557>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; chudopim@mail.ru[✉], xen_os@inbox.ru, sizov.alex@gmail.com

Поступила в редакцию 01.10.20 / Одобрена после рецензирования 16.12.20 / Принята к печати 19.12.20

Аннотация. Микрокристаллическая целлюлоза – распространенный продукт, используемый в фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности. Получают микрокристаллическую целлюлозу жидкофазным гидролизом хлопковой или древесной беленой целлюлозы разбавленными 0,5...10,0 %-ми минеральными кислотами при температуре 100...140 °С. Данный процесс требует значительного расхода кислоты, воды и тепловой энергии. Процесс производства микрокристаллической целлюлозы в целом весьма затратный, что определяет ее высокую стоимость и необходимость поиска альтернативных методов гидролиза целлюлозы. Предложено проводить гидролиз целлюлозы концентрированной хлористоводородной кислотой, образующейся при абсорбции хлористого водорода. Исследованы процессы адсорбции хлористого водорода древесной беленой целлюлозой влажностью 8...18 %. Показано, что адсорбция хлористого водорода определяется влажностью целлюлозы и составляет 3...5 % от массы сухой целлюлозы. Сорбция хлористого водорода приводит к образованию во влаге сырья соляной кислоты концентрацией 25...40 %, значительному разогреву массы и быстрому гидролизу аморфной фракции целлюлозы. Выявлено, что применение чистого хлористого водорода обуславливает сильное потемнение и гумификацию целлюлозы. Рекомендуем использование газоздушных смесей хлористого водорода для насыщения целлюлозы, что значительно снизит температуру сорбции и исключит сильное потемнение целлюлозы в процессе гидролиза. Адсорбция хлористого водорода целлюлозой протекает с очень высокой скоростью и сопровождается образованием хорошо видимого фронта сорбции температурой 45...60 °С. Гидролиз происходит в течение 15...30 мин при 40...60 °С до полного разложения аморфной фракции целлюлозы. Образуется очень небольшое количество моносахаридов (4 % сухой целлюлозы). Выход микрокристаллической целлюлозы высокий – более 95 %. Последние два факта, вероятно, объясняются характерной для гидролиза концентрированными кислотами рекристаллизацией части аморфных фрагментов макромолекул целлюлозы. Полученный продукт по данным ИК-спектроскопии, рентгеновской дифракции и вискозиметрии идентичен коммерческим образцам микрокристаллической целлюлозы известных фирм. Показана высокая эффективность процесса гидролиза целлюлозы газоздушными смесями хлористого водорода в сравнении с традиционными способами получения микрокристаллической целлюлозы.

© Пименов С.Д., Мзиков Г.В., Сизов А.И., 2022

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: микрокристаллическая целлюлоза, гидролиз микрокристаллической целлюлозы, хлористый водород, степень полимеризации, адсорбция хлористого водорода целлюлозой, газоздушные смеси

Для цитирования: Пименов С.Д., Мзюков Г.В., Сизов А.И. Гидролиз целлюлозы с использованием газоздушных смесей хлористого водорода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 191–202. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-191-202>

Original article

Cellulose Hydrolysis Using Hydrogen Chloride Gas-Air Mixtures

Sergey D. Pimenov[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [AAC-9435-2020](https://orcid.org/0000-0001-6042-0021),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6042-0021>

Georgy V. Mzokov, Process Engineer; ResearcherID: [AAD-5436-2020](https://orcid.org/0000-0003-3610-316X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3610-316X>

Alexander I. Sizov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAI-2030-2020](https://orcid.org/0000-0001-9412-5557),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-5557>

Saint Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; chudopim@mail.ru[✉], xen_os@inbox.ru, sizov.alex@gmail.com

Received on October 1, 2020 / Approved after reviewing on December 16, 2020 / Accepted on December 19, 2020

Abstract. Microcrystalline cellulose (MCC) is a common product used in pharmaceutical, food and other industries. MCC is obtained by liquid-phase hydrolysis of cotton or wood bleached pulp with diluted 0.5–10.0 % mineral acids at a temperature of 100–140 °C. This process requires significant consumption of acid, water, and heat energy. Production of MCC in general is very expensive, which determines its high cost and the need to find alternative methods of cellulose hydrolysis. It is proposed to hydrolyze cellulose with concentrated hydrochloric acid produced by absorption of hydrogen chloride. We studied the processes of hydrogen chloride adsorption by bleached wood pulp with 8–18 % humidity. It is shown that adsorption of hydrogen chloride is determined by pulp humidity and is 3–5 % of the dry pulp mass. The sorption of hydrogen chloride leads to the formation of hydrochloric acid with a concentration of 25–40 % in the raw material moisture, significant heating of the mass and rapid hydrolysis of the amorphous cellulose fraction. It has been found that the use of pure hydrogen chloride for saturation causes strong darkening and humification of pulp. We recommend the use of hydrogen chloride gas-air mixtures to saturate the pulp, which will significantly reduce the sorption temperature and eliminate the strong darkening of the pulp during hydrolysis. The adsorption of hydrogen chloride by cellulose proceeds at an extremely high rate and is accompanied by the formation of a clearly visible sorption front at a temperature of 45–60 °C. Hydrolysis occurs for 15–30 min at 40–60 °C until the amorphous cellulose fraction is completely decomposed. A very small amount of monosaccharides is formed (4 % of dry pulp). The yield of MCC is high, more than 95 %. These circumstances are probably related to the recrystallization of a part of the amorphous fragments of cellulose macromolecules, which is a characteristic of hydrolysis with concentrated acids. The product obtained by cellulose hydrolysis is identical to MCC according to the data of IR spectroscopy, X-ray diffraction and viscometry. The article shows the high efficiency of cellulose hydrolysis with hydrogen chloride gas-air mixtures compared to traditional methods of MCC production.



Keywords: microcrystalline cellulose, microcrystalline cellulose hydrolysis, hydrogen chloride, degree of polymerization, hydrogen chloride adsorption by cellulose, gas-air mixtures

For citation: Pimenov S.D., Mzokov G.V., Sizov A.I. Cellulose Hydrolysis Using Hydrogen Chloride Gas-Air Mixtures. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 191–202. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-191-202>

Введение

Микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ) находит широкое применение в фармацевтической, пищевой, лакокрасочной и других отраслях промышленности. Общий мировой объем производства МКЦ в 2018 г. составил более 270 тыс. т на общую сумму 885,1 млн долл. с тенденцией роста более 7 % в год [10, 26].

Традиционно МКЦ получают жидкофазным способом [15, 16]. Целлюлозу гидролизуют разбавленными растворами серной или соляной кислоты с концентрацией до 10 % [11, 12, 25]. Температура процесса составляет 100...140 °С, продолжительность – 60...120 мин, гидромодуль – не менее 10 [4, 23, 24]. Технологический режим выбирается из условия гидролиза только аморфной фракции целлюлозы – это 8...10 % от ее массы.

Волокна целлюлозы после разрушения аморфной фракции [5, 30] распадаются на мелкие частицы с высоким индексом кристалличности [8, 28]. Доступность гликозидных связей в плотноупакованных структурах кристаллитов значительно снижается, дальнейший гидролиз практически прекращается и степень полимеризации целлюлозы далее не изменяется, что определяет второе название МКЦ – целлюлоза предельной степени полимеризации [27, 31].

Помимо гидролиза разбавленными минеральными кислотами [18, 19, 32] известны способы гидролиза древесины концентрированной хлористоводородной кислотой [14]. Такой способ обладает рядом технологических преимуществ, связанных с высокой скоростью и низкими температурами протекания процесса [21]. Однако существует проблема: необходимость создания высокой концентрации кислоты в массе целлюлозы. Наиболее простым решением здесь является насыщение целлюлозы газообразным хлористым водородом (ХВ) [7].

При переработке большинства растительных материалов, ввиду их пористой структуры, тепломассообменные процессы в объеме сырья протекают медленно. Проникновение кислоты в толщу целлюлозы и последующий равномерный нагрев всего объема гидролизуемого материала затруднены. Поэтому для создания гомогенных условий при химической переработке растительных материалов процессы проводят только с измельченным сырьем, в течение длительного времени и в сильно разбавленных суспензиях [20, 22].

В отличие от этого адсорбция ХВ воздушно-сухой целлюлозой протекает очень быстро. ХВ хорошо абсорбируется водой и даже при низких парциальных давлениях обеспечивает получение концентрированной соляной кислоты [21]. Адсорбция ХВ водой – экзотермический процесс. Изменение энтальпии при образовании раствора соляной кислоты концентрацией 36 % составляет 1636 кДж·кг⁻¹ [8]. Эти особенности обуславливают то, что в целлюлозе равномерно по всему объему образуется соляная кислота и параллельно происходит разогрев массы, т. е. создаются условия для гидролиза гликозидных связей.

ХВ сорбируется только влагой растительного сырья. Влага целлюлозы и растительных материалов поглощают на 20...25 % ХВ больше, чем вода, что объясняется влиянием капиллярных эффектов [13].

Адиабатическая сорбция ХВ сопровождается повышением температуры воздушно-сухой целлюлозы во всем объеме массы. Откуда вытекают две формулы, приведенные ниже. Так,

$$T = T_0 - \frac{CK}{C_{ц} + C_{в} \frac{W}{100} + CC_{HCl}},$$

где T_0 и T – начальная и конечная температура целлюлозы соответственно, °С; C – адсорбция ХВ, кг/кг а. с. ц.; K – энтальпия образования соляной кислоты, кДж/кг; $C_{ц}$, $C_{в}$, C_{HCl} – теплоемкость целлюлозы, воды и ХВ соответственно, кДж/(кг · °С); W – влажность целлюлозы, %.

Известно, что при температуре более 50 °С целлюлоза, насыщенная ХВ, начинает быстро темнеть, а при более высоких температурах гумифицируется. Авторы работы [21] для исключения гумификации при гидролизе использовали предварительно высушенную целлюлозу влажностью 3...5 % или проводили насыщение в неадиабатических условиях с организацией интенсивного теплоотвода за счет рециркуляции холодного ХВ.

Радикальным способом снижения температуры сорбции, на наш взгляд, является использование газозвушных смесей ХВ. Разбавление ХВ воздухом уменьшает равновесную [9] концентрацию кислоты во влаге целлюлозы и снимает часть тепла сорбции за счет нагрева воздуха. Температура при достижении равновесной концентрации ХВ в целлюлозной массе будет определяться уравнением

$$T = T_0 - \frac{CK}{C_{ц} + C_{в} \frac{W}{100} + CC_{HCl} + \frac{C(100-x)}{100} C_{воз}},$$

где K – теплота сорбции ХВ, кДж/кг; x – концентрация ХВ в воздухе, %; $C_{воз}$ – теплоемкость воздуха, кДж/(кг · °С).

На рис. 1 приведены графики изменения температуры целлюлозы с различной исходной влажностью при сорбции ХВ из газозвушных смесей различной концентрации, рассчитанные по уравнениям, представленным выше.

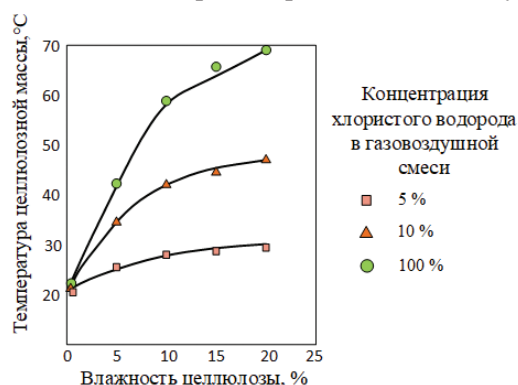


Рис. 1. Изменение температуры целлюлозной массы при сорбции ХВ из газозвушных смесей различной концентрации

Fig. 1. Changes in the temperature of pulp during sorption of hydrogen chloride from gas-air mixtures of different concentrations

Как видно из графиков, использование газозвушных смесей позволяет значительно снизить температуру сорбции ХВ и делает возможным исключение гумификации целлюлозы при гидролизе.

Проведены исследования процесса гидролиза целлюлозы и получения МКЦ с использованием газозвудушных смесей ХВ.

Объекты и методы исследования

В качестве материала для гидролиза использовали произведенную из хвойных пород древесины листовую сульфатную [1] беленую целлюлозу Братского целлюлозно-бумажного комбината. Целлюлозу измельчали на шредере до размера частиц 3×30 мм. ХВ получали разложением соляной кислоты раствором хлористого кальция концентрацией 36...50 % при температуре кипения раствора [3].

Исследования кристалличности целлюлозы проводили дифрактометром D8 Discover (Bruker AXS) с источником излучения $\text{CuK}\alpha$ и позиционно-чувствительным детектором. Интервал углов 2θ 5...70 ° с шагом 0,05 ° и экспозицией в точке 0,5 с. Съемка ИК-спектров осуществлена при помощи ИК-Фурье спектрофотометра ФСМ-1201 и формованных таблеток KBr с нанесенным тонким слоем образцов целлюлозы и МКЦ в соотношении 1:100.

Процесс гидролиза целлюлозы газообразным ХВ из газозвудушных смесей исследовали в статических условиях на установке, схема которой приведена на рис. 2.

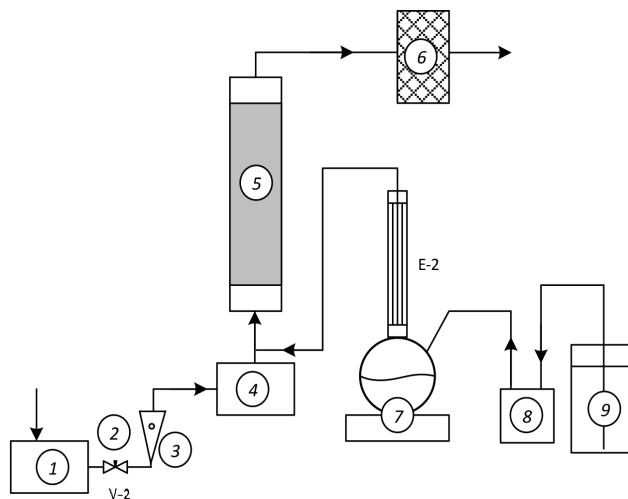


Рис. 2. Схема установки для гидролиза целлюлозы газозвудушными смесями ХВ

Fig. 2. Installation diagram for cellulose hydrolysis with hydrogen chloride gas-air mixtures

Перед проведением сорбции включали компрессор 1 и устанавливали заданный расход воздуха ротаметром 3, включали системы нагрева воздуха 4 и генератор ХВ (установка разложения соляной кислоты) 7. Прогрев всех элементов конструкции проходил в течение 30 мин. После нагрева образец целлюлозы известной влажности массой 100...150 г помещали в теплоизолированный реактор 5 размером 50×400 мм и начинали подачу с заданной скоростью соляной кислоты 9 в генератор ХВ. Смесь ХВ с воздухом концентрацией 25 % поступала в реактор.

Установка, представленная на рис. 2, кроме перечисленных элементов включала в себя вентиль 2, абсорбер-нейтрализатор 6 и дозатор 8.

Сорбция ХВ сопровождалась нагревом массы и образованием хорошо видимой линии фронта сорбции. Температура фронта, измеренная термопарой, достигала 50...70 °С, процесс сопровождался потемнением целлюлозы. Гидролиз начинался после полного насыщения всего объема целлюлозы.

По завершении гидролиза образец гидролизованной целлюлозы заливали горячей водой и выдерживали при перемешивании в течение 15 мин. В экстракте определяли содержание ХВ и редуцирующих веществ (сахаров) [10]. Далее гидролизат-массу промывали на фильтре водой до нейтральной реакции по метилоранжу, сушили при 105 °С и взвешивали для определения выхода от исходной навески. После устанавливали степень полимеризации, белизну и кристалличность полученной МКЦ.

Анализ редуцирующих веществ и кислотности проводили по методикам, описанным в [2]. Характеристическую вязкость растворов целлюлозы и МКЦ определяли по ГОСТ 25438–82 с использованием кадоксена.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 приведена динамика характеристической вязкости и белизны образцов целлюлозы, полученных гидролизом ХВ из газовой смеси с температурой 45 °С и парциальными давлениями 100 и 25 кПа (влажность целлюлозы – 12 %).

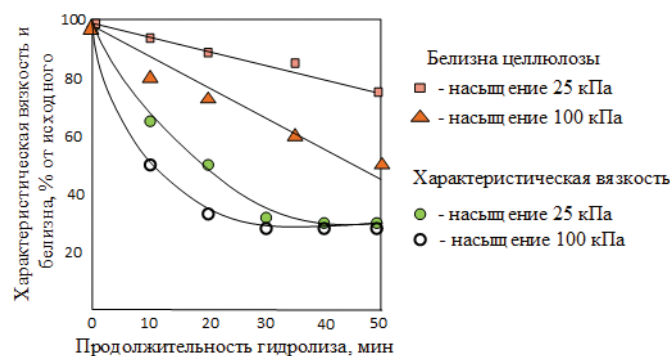


Рис. 3. Изменение характеристической вязкости и белизны целлюлозы при гидролизе газовой смесью ХВ

Fig. 3. Change in intrinsic viscosity and whiteness of pulp during hydrolysis by hydrogen chloride gas-air mixtures

Как видно из графиков, снижение характеристической вязкости (степень полимеризации) целлюлозы происходило в первые 20 мин гидролиза, после чего вязкость практически не менялась. Этот факт указывает на достижение целлюлозой предельной степени полимеризации, характерной для образования МКЦ.

Таблица 1

Характеристика гидролизат-массы, полученной при гидролизе целлюлозы различной влажности газовой смесью хлористого водорода (25 %)

Table 1

Characterization of the hydrolyzate mass obtained by hydrolysis of pulp of various humidity by gas-air mixture of hydrogen chloride (25 %)

Влажность целлюлозы, %	Сорбция ХВ, % от а. с. ц.	Температура фронта сорбции, °С	Концентрация ХВ во влаге целлюлозы, %	Характеристическая вязкость, % от вязкости исходной целлюлозы
8	3,5	48	40,2	55
10	4,0	51	36,0	37
12	4,4	52	32,3	37,5
15	5,0	55	28,3	37
18	5,2	56	23,7	32

При абсорбции ХВ с парциальным давлением 100 кПа белизна целлюлозы снизилась более чем на 40 % по сравнению с исходной – произошла существенная деструкция части образовавшихся при гидролизе моносахаридов. Гидролиз целлюлозы газовой смесью с парциальным давлением 25 кПа значительно уменьшил «жесткость» процесса и позволил получать целлюлозу низкой характеристической вязкости при снижении исходной белизны всего на 15 %.

В табл. 1 приведены данные по гидролизу целлюлозы различной влажности газовой смесью ХВ с парциальным давлением 25 кПа (температура – 45 °С, продолжительность гидролиза – 30 мин).

Из данных табл. 1 видно, при сорбции ХВ в целлюлозе образуется соляная кислота высокой концентрации и происходит кратковременный разогрев массы в зоне фронта сорбции. Эти условия определяют протекание гидролиза аморфной фракции и образование целлюлозы предельной степени полимеризации, как при традиционном способе получения МКЦ.

В соответствии с ГОСТ 9105–74 влажность листовой древесной целлюлозы составляет не более 20 %. При хранении на отопляемых складах влажность целлюлозы снижается, но, как правило, находится в пределах 8...18 %. Из данных табл. 1 следует вывод, что воздушно-сухая древесная беленая целлюлоза практически всего диапазона влажности может быть гидролизована ХВ до предельной минимальной степени полимеризации.

На рис. 4 приведены ИК-спектры поглощения коммерческих образцов МКЦ фирмы JRS Pharma VIVAPUR® 101 (Германия) и гидролизат-массы, полученной из целлюлозы влажностью 12 % при гидролизе газовой смесью ХВ с парциальным давлением 25 кПа (температура – 45 °С, продолжительность – 30 мин). Как видно, ИК-спектры совпадают даже в области «отпечатков пальцев», что указывает на идентичность образцов.

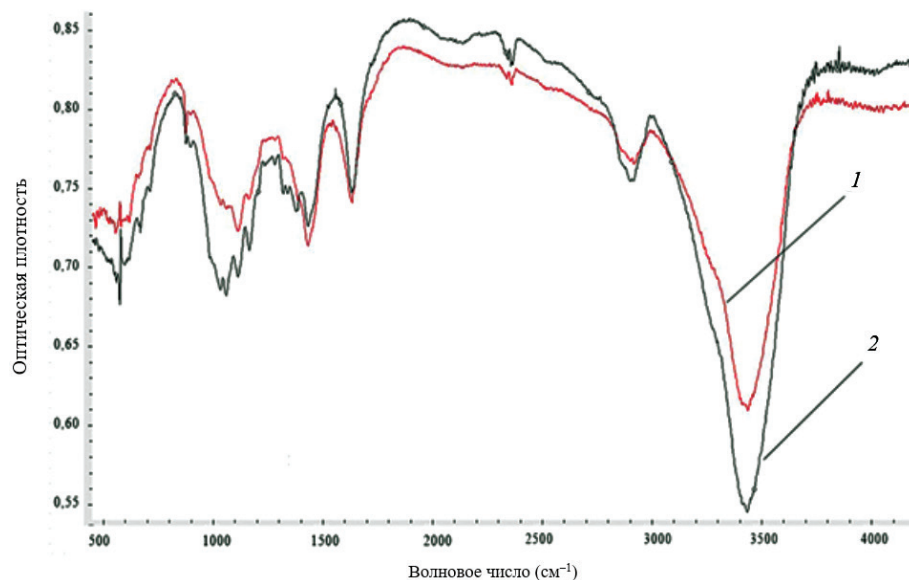


Рис. 4. ИК-спектры: 1 – МКЦ JRS Pharma VIVAPUR® 101 (Германия); 2 – гидролизат-масса, полученная в ходе исследования

Fig. 4. IR spectra: 1 – MCC JRS Pharma VIVAPUR® 101 (Germany); 2 – hydrolyzate mass obtained during the study

Гидролиз аморфной фракции целлюлозы и образование МКЦ сопровождаются резким снижением степени полимеризации и увеличением индекса кристалличности материала [6]. На рис. 5 приведены рентгеновские дифрактограммы коммерческого образца МКЦ фирмы JRS Pharma VIVAPUR® 101 (Германия), полученной нами гидролизат-массы и исходной целлюлозы.

Индекс кристалличности образцов, рассчитанный по высотам пиков $(I_{002} - I_{am}) / I_{002}$, для гидролизат-массы и коммерческого образца МКЦ JRS Pharma VIVAPUR® 101 (Германия) был одинаковым и составлял 81,9 %, в то время как для исходной целлюлозы это значение равнялось 68,3 % [29].

Данные ИК-спектроскопии, вискозиметрии и рентгеновской дифрактометрии позволяют однозначно идентифицировать гидролизат-массу, полученную гидролизом целлюлозы газовоздушными смесями ХВ, как МКЦ.

В табл. 2 приведены данные по сравнению способа гидролиза целлюлозы газовоздушными смесями ХВ с традиционным способом получения МКЦ [17].

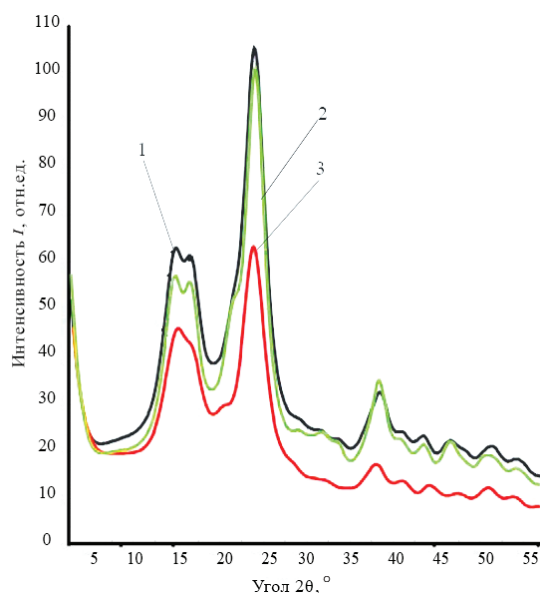


Рис. 5. Рентгеновские дифрактограммы: 1 – МКЦ JRS Pharma VIVAPUR® 101; 2 – гидролизат-масса, полученная из целлюлозы влажностью 12 % гидролизом газовоздушной смесью ХВ с парциальным давлением 25 кПа (температура – 45 °С, продолжительность – 30 мин); 3 – исходная целлюлоза

Fig. 5. X-ray diffraction patterns: 1 – MCC JRS Pharma VIVAPUR® 101; 2 – hydrolyzate mass obtained from pulp with 12 % humidity by hydrolysis with a hydrogen chloride gas-air mixture of with a partial pressure of 25 kPa (temperature – 45 °C, time – 30 min); 3 – source cellulose

Таблица 2

Сравнение технологических параметров гидролиза целлюлозы газовоздушными смесями хлористого водорода с традиционным способом получения МКЦ

Table 2

Comparison of the technological parameters of cellulose hydrolysis with hydrogen chloride gas-air mixtures with the traditional method of obtaining MCC

Условия гидролиза	Выход, % от а. с. ц.		Расход		Подождительность гидролиза, мин
	МКЦ	сахаров	кислоты, % от а. с. ц.	тепла, Гкал/т	
25 кПа ХВ; целлюлоза влажностью 18 %; температура – 45 °С	95,0	4,0	5,5	–	20
25 кПа ХВ; целлюлоза влажностью 8 %; температура – 45 °С	94,3	4,0	3,0	–	30
1,5 % HCl; гидромодуль – 12, 120 °С	90,1	9,5	18,0	1,4	120

Как видно из данных табл. 2, способ гидролиза с использованием газоздушных смесей ХВ значительно эффективней традиционного: скорость протекания процесса высокая, а расход кислоты и энергетических ресурсов небольшой.

Обращает на себя внимание очень низкое образование моносахаридов и высокий выход МКЦ при гидролизе целлюлозы (табл. 2). На наш взгляд, это связано с рекристаллизацией части аморфных фрагментов макромолекул целлюлозы, что характерно для гидролиза целлюлозы концентрированными кислотами, как в случае гидролиза с использованием ХВ [3].

Выводы

1. Сорбция хлористого водорода воздушно-сухой целлюлозой из газоздушных смесей сопровождается нагревом и образованием соляной кислоты высокой концентрации в массе сырья.

2. В процессе сорбции начинается гидролиз аморфной фракции целлюлозы, который проходит в течение 15...30 мин при температуре 40...60 °С и приводит к получению целлюлозы предельной степени полимеризации.

3. Данные ИК-спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии однозначно указывают на образование микрокристаллической целлюлозы в процессе гидролиза целлюлозы хлористым водородом.

4. Процесс гидролиза с использованием газоздушных смесей хлористого водорода высокоэффективен в сравнении с традиционным способом получения микрокристаллической целлюлозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Болтовский В.С. Способы получения микрокристаллической целлюлозы // Тр. БГТУ. Сер. 2: Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 1(241). С. 40–50.

Boltovskiy V.S. Production Method Microcrystalline Cellulose (Review). *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 1 (241), pp. 40–50. (In Russ.). <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2021-241-1-40-50>

2. Емельянова И.З. Химико-технический контроль гидролизных производств. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 328 с.

Emel'yanova I.Z. *Chemical and Engineering Control of Hydrolysis Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 328 p. (In Russ.).

3. Левинский М.И., Мазанко А.Ф., Новиков И.Н. Хлористый водород и соляная кислота. М.: Химия, 1985. 157 с.

Levinskiy M.I., Mazanko A.F., Novikov I.N. *Hydrogen Chloride and Hydrochloric Acid*. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 157 p. (In Russ.).

4. Носкова О.А., Зырянова О.А., Вельможин С.Д. Использование древесной целлюлозы для получения белой порошковой целлюлозы // Вестн. ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2016. № 4. С. 57–69.

Noskova O.A., Zyryanova O.A., Velmozhin S.D. Application of the Wood Pulp for Receiving Bleached Powder Cellulose. *PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology*, 2016, no. 4, pp. 57–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2016.4.04>

5. Патент 2188208 С1 РФ. Способ получения микрокристаллической целлюлозы: № 2001110549/04: заявл. 17.04.2001: опубл. 27.08.2002 / Ф.Х. Хакимова, Т.Н. Ковтун, О.А. Носкова.

Khakimova F.Kh., Kovtun T.N., Noskova O.A. *Method for Production of Microcrystalline Cellulose*. Patent RF no. RU 2 188 208 C1, 2002. (In Russ.).

6. Патент 2192432 С1 РФ. Способ получения порошковой целлюлозы: № 2001120616/04: заявл. 23.07.2001: опубл. 10.11.2002 / Ф.Х. Хакимова, Т.Н. Ковтун, О.А. Носкова, А.Я. Перевалов.

Khakimova F.Kh., Kovtun T.N., Noskova O.A., Perevalov A.Ja. *Method of Production of Powder Cellulose*. Patent RF no. RU 2 192 432 C1, 2002. (In Russ.).

7. Пименов С.Д. Разработка способа получения гидролизат-массы из древесной целлюлозы для производства МКЦ: выпуск. квалификац. работа магистра. СПб.: СПб-ГЛТУ, 2019. С. 71.

Pimenov S.D. *Development of a Method for Obtaining Hydrolyzate Mass from Wood Pulp for the Production of MCC*: Master's Thesis. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2019, p. 71. (In Russ.).

8. Сарымсаков А.А., Балтаева М.М., Набиев Д.С., Рашидова С.Ш., Югай С.М. Диспергированная микрокристаллическая целлюлоза и гидрогели на ее основе // Химия растит. сырья. 2004. № 2. С. 11–16.

Sarymsakov A.A., Baltayeva M.M., Nabiyev D.S., Rashidova S.Sh., Yugay S.M. Dispersed Microcrystalline Cellulose and Hydrogels Based on It. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya* = Chemistry of Plant Raw Materials, 2004, no. 2, pp. 11–16. (In Russ.).

9. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. 2-е изд., перераб. и доп. Т. 3: Химическое равновесие и кинетика. Свойства растворов. Электродные процессы. М.; Л.: Химия, 1965. 1005 с.

Handbook of a Chemist. Ed. by Nikol'skiy. Vol. 3: Chemical Equilibrium and Kinetics. The properties of solutions. Electrode processes. Moscow, Khimiya Publ., 1965. 1005 p. (In Russ.).

10. Сунайт В.Н. Получение порошковой целлюлозы из древесной массы: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 134 с.

Sunayt V.N. *Obtaining Powder Cellulose from Wood Pulp*: Cand. Eng. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2019. 134 p. (In Russ.).

11. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств М.: Лесн. пром-сть, 1989. 496 с.

Khol'kin Yu.I. *Hydrolysis Production Technology*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 496 p. (In Russ.).

12. Целлюлоза и ее производные / под ред. Н. Байклза и Л. Сегала; пер. с англ. под ред. З.А. Роговина. Т. 2. М.: Мир, 1974. 510 с.

Cellulose and Cellulose Derivatives. Ed. by N.M. Bikles, L. Segal. Transl. from English. Ed. by Z.A. Rogovin. Moscow, Mir Publ., 1974, vol. 2. 510 p. (In Russ.).

13. Чалов Н.В., Леуцук А.Е. Непрерывный гидролиз полисахаридов растительной ткани 46–48 %-ной соляной кислотой. Сообщение 3. Поглощение хлористого водорода влажной древесиной // Изв. вузов. Лесн. журн. 1966. № 6. С. 139–143.

Chalov N.V., Leshchuk A.E. Continuous Hydrolysis of Plant Tissue Polysaccharides with 46–48 % Hydrochloric Acid. Report 3. Absorption of Hydrogen Chloride by Wet Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forest Journal, 1966, no. 6, pp. 139–143. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1966/201966.pdf>

14. Шейхет Ф.И. Материаловедение химикатов, красителей и моющих средств. М.: Легкая индустрия, 1969. 323 с.

Sheykhet F.I. *Materials Science of Chemicals, Dyes and Detergents*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1969. 323 p. (In Russ.).

15. Щербакова Т.П., Котельникова Н.Е., Быховцева Ю.В. Сравнительное изучение образцов порошковой и микрокристаллической целлюлозы различного природного происхождения. Физико-химические характеристики // Химия растит. сырья. 2011. № 3. С. 33–42.

Shcherbakova T.P., Kotel'nikova N.E., Bykhovtseva Yu.V. Comparative Study of Samples of Powder and Microcrystalline Cellulose of Various Origin. Physical and Chemical Characteristics. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* = Chemistry of Plant Raw Materials, 2011, no. 3, pp. 33–42. (In Russ.).

16. Battista O.A. Hydrolysis and Crystallization of Cellulose. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1950, vol. 42, no. 3, pp. 502–507. <https://doi.org/10.1021/ie50483a029>

17. Battista O.A., Hill D., Smith P.A. *Level-Off D.P Cellulose Products*. Patent US no. 2,978,446, 1961.

18. Battista O.A., Smith P.A. Microcrystalline Cellulose. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1962, vol. 54, no. 9, pp. 20–29. <https://doi.org/10.1021/ie50633a003>

19. Chaerunisa A.Y., Sriwidodo S., Abdassah M. Microcrystalline Cellulose as Pharmaceutical Excipient. *Pharmaceutical Formulation Design – Recent Practices*. Ed. by U. Ahmad, J. Akhtar. London, IntechOpen, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88092>

20. El-Sakhawy M., Hassan M.L. Physical and Mechanical Properties of Microcrystalline Cellulose Prepared from Agricultural Residues. *Carbohydrate Polymers*, 2007, vol. 67, iss. 1, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.04.009>

21. Higgins F.J., Ho G.E. Hydrolysis of Cellulose Using HCl: A Comparison between Liquid Phase and Gaseous Phase Processes. *Agricultural Wastes*, 1982, vol. 4, iss. 2, pp. 97–116. [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(82\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0141-4607(82)90019-1)

22. Huntley C.J., Crews K.D., Abdalla M.A., Russell A.E., Curry M.L. Influence of Strong Acid Hydrolysis Processing on the Thermal Stability and Crystallinity of Cellulose Isolated from Wheat Straw. *International Journal of Chemical Engineering*, 2015, vol. 2015, art. 658163. <https://doi.org/10.1155/2015/658163>

23. Ibrahim M.M., El-Zawawy W.K., Jüttke Y., Koschella A., Heinze T. Cellulose and Microcrystalline Cellulose from Rice Straw and Banana Plant Waste: Preparation and Characterization. *Cellulose*, 2013, vol. 20, pp. 2403–2416. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-9992-5>

24. Ioelovich M. Green Technology of Microcrystalline Cellulose. *SITA*, 2018, vol. 20, iss. 2, pp. 3–7.

25. Karppi A., Vuorenalo V.-M., Robertsen L., Parviainen K., Dahl O., Vanhatalo K. *Process for Producing Microcellulose*. Patent CA no. CA 2801987 A1, 2011.

26. *Microcrystalline Cellulose (MCC) Market by Application (Food & Beverage, Pharmaceutical, Cosmetics & Personal Care), Raw Material Source (Wood-based, Non-wood-based), and Region (North America, Europe, APAC, RoW) – Global Forecasts to 2024*. Report. 2019. 109 p. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/microcrystalline-cellulose-market-59144224.html> (accessed 12.12.19).

27. Palme A., Theliander H., Brelid H. Acid Hydrolysis of Cellulosic Fibres: Comparison of Bleached Kraft Pulp, Dissolving Pulps and Cotton Textile Cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 2016, vol. 136, pp. 1281–1287. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.015>

28. Park S., Baker J.O., Himmel M.E., Parilla P.A., Johnson D.K. Cellulose Crystallinity Index: Measurement Techniques and Their Impact On Interpreting Cellulase Performance. *Biotechnology for Biofuels*, 2010, vol. 3, art. 10. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-3-10>

29. Segal L., Creely J.J., Martin A.E., Jr., Conrad C.M. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. *Textile Research Journal*, 1959, vol. 29, iss. 10, pp. 786–794. <https://doi.org/10.1177/004051755902901003>

30. Tan Z., Eustace S., Sestrick M., Ondov J. *Method of Making Bleached Microcrystalline Cellulose*. Patent EU no. EP 3 294 951 B1, 2016.

31. Vanhatalo K.M., Dahl O.P. Effect Acid Hydrolysis Parameters on Properties of Microcrystalline Cellulose. *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 3, pp. 4729–4740. <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.4729-4740>

32. Yusrina RRAK, Sutriyo, Suryadi H. Preparation and Characterization of Microcrystalline Cellulose Produced from Betung Bamboo (*Dendrocalamus asper*) through Acid Hydrolysis. *Journal of Young Pharmacists*, 2018, vol. 10, iss. 2, pp. s79–s83. <https://doi.org/10.5530/jyp.2018.2s.15>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article



Научная статья

УДК 656.7.025

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-203-212

Навигационно-пилотажная система транспортных беспилотных летательных аппаратов для лесохозяйственной практики

О.В. Скуднева, ст. преподаватель; ResearcherID: [V-5466-2017](https://orcid.org/0000-0001-6387-0108).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6387-0108>

Научно-учебный комплекс «Фундаментальные науки» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Рубцовская наб., д. 2/18, Москва, Россия, 105005; chukchuk@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.05.20 / Одобрена после рецензирования 13.08.20 / Принята к печати 20.08.20

Аннотация. На сегодняшний день существует необходимость увеличения количества авиационных транспортных перевозок «легких» грузов в лесопромышленной и лесохозяйственной практике, в практике работы промышленных предприятий, службы лесоохраны, МЧС и др. Использование вертолетов не может обеспечить оперативность и не всегда рационально в случаях перевозки незначительных по массе грузов на малые расстояния, но крайне необходимых, например, для пожаротушения в условиях бездорожья. Приводятся доказательства производственной и экономической целесообразности создания транспортных беспилотных летательных аппаратов с навигационно-пилотажными системами, которые должны обеспечивать автоматический полет и доставку грузов в район лесохозяйственной зоны. Приведены эскиз карты полета и параметры курса беспилотного летательного аппарата, а также структурная блок-схема работы навигационно-пилотажной системы. Рассмотрено взаимодействие входящих в нее устройств для решения навигационных задач. Отмечено, что создание навигационно-пилотажной системы в целях выполнения автоматической навигации беспилотных летательных аппаратов должно осуществляться на основе законов прикладной математики и их реализации при разработке алгоритмов и программно-математического обеспечения в составе бортового вычислителя навигационно-пилотажной системы. Навигационно-пилотажные системы, созданные на базе предложенной структурной схемы, могут найти применение в области контроля экологической обстановки, при наблюдении за живой природой, лесными запасами и другими природными ресурсами страны. Использование беспилотных летательных аппаратов позволит обеспечить безопасность жителей в случае экологических и техногенных катастроф. Повысится оперативность доставки грузов в удаленные районы РФ в промышленных целях и для обеспечения работ Министерства обороны по защите северных рубежей, охране природных ресурсов Северного Ледовитого океана и др. Учитывая современный уровень развития техники, несмотря на имеющиеся значительные трудности технического и финансового обеспечения при внедрении и эксплуатации беспилотных летательных аппаратов, считаем целесообразным и возможным рекомендовать создание таких средств

транспортировки. Технические возможности для разработки беспилотных летательных аппаратов в отечественной промышленности есть. Окончательное решение о целесообразности их создания должны принимать заинтересованные организации.

Ключевые слова: лесохозяйственные работы, транспортный беспилотный летательный аппарат, навигационно-пилотажная система, доставка грузов, доставка грузов воздушным путем

Для цитирования: Скуднева О.В. Навигационно-пилотажная система транспортных беспилотных летательных аппаратов для лесохозяйственной практики // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 203–212. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-203-212>

Original article

Flight Navigation System of Transport Unmanned Aerial Vehicles for Forestry Practice

Oksana V. Skudneva, Senior Lecturer; ResearcherID: [V-5466-2017](https://orcid.org/0000-0001-6387-0108),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6387-0108>

Faculty of Fundamental Sciences at Bauman Moscow State Technical University, Rubtsovskaya naberezhnaya, 2/18, Moscow, 105005, Russian Federation; chykchyk@yandex.ru

Received on May 27, 2020 / Approved after reviewing on August 13, 2020 / Accepted on August 20, 2020

Abstract. Nowadays there is a need to increase air transportation of light-weighted cargo in timber industry and forestry practice, in the work of industrial enterprises, forest protection services, the Ministry of Emergency Situations, etc. The use of helicopters cannot ensure efficiency and is not always advisable in cases of transportation of light-weighted, but extremely necessary cargo over short distances, for example, for fire extinguishing in off-road conditions. The article provides evidence of the production and economic feasibility of creating transport unmanned aerial vehicles (UAVs) with flight navigation systems (FNS), which should ensure automatic flight and delivery of goods to the area of the forestry zone. The article provides a sketch of the flight map and the parameters of the UAV heading, as well as the block diagram of the FNS. The interaction of input devices for solving navigation problems is considered. The article notes that the FNS creation for automatic navigation of UAVs should be solved on the basis of the laws of applied mathematics and the ability to implement them in the development of algorithms and software and mathematical support as part of the FNS on-board computer. FNSs on the basis of the proposed structural scheme can also find application in order to control the environmental situation, to provide assistance in solving forestry problems related to monitoring and control over the conservation of wildlife, forest reserves and other natural resources of the country. The use of UAVs will ensure the safety of residents in the event of environmental and anthropogenic disasters. This will increase the efficiency of cargo delivery to remote areas of Russia for industrial purposes and to support the work of the Ministry of Defense to protect the northern borders, the protection of natural resources of the Arctic Ocean, etc. We consider it expedient and possible to recommend the creation of UAVs as transport vehicles, having regard to the current level of technological development, despite the existing significant challenges of technical and financial support during the introduction and operation of such vehicles. The domestic industry has the technical capabilities to develop UAVs. The feasibility of their creation should be determined by the interested organizations.



Keywords: forestry operations, transport unmanned aerial vehicle, flight navigation system, cargo delivery, cargo delivery by air

For citation: Skudneva O.V. Flight Navigation System of Transport Unmanned Aerial Vehicles for Forestry Practice. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 203–212. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-203-212>

Введение

В настоящее время при выполнении лесохозяйственных работ и работ, связанных с тушением лесных пожаров, основными видами транспорта являются тракторы и другие виды колесной техники, а также вертолеты, осуществляющие перевозку специалистов, оборудования для тушения пожаров и пр. Для ведения лесохозяйственных работ необходима доставка запасных частей, химических средств для обработки лесных массивов и др. Эффективность работ по ликвидации возгорания в значительной степени зависит от оперативности подвоза средств пожаротушения, обеспечения специалистов лесоохраны и МЧС продуктами питания и всем необходимым для обустройства жизни в полевых условиях. Использование вертолетов для этих целей затруднено в первую очередь из-за высоких цен на обслуживание. Поэтому надо находить другие способы доставки грузов, с учетом условий удаленности и бездорожья. Решением может стать создание транспортных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с навигационно-пилотажной системой (НПС), которая должна обеспечивать автоматический безопасный полет летательного аппарата (ЛА) к месту доставки груза.

Объекты и методы исследования

Транспортные БПЛА. НПС. Необходимость и целесообразность. Известна поговорка – «Нет таких задач, которые не могли бы решить инженеры». М.В. Ломоносов в 1754 г. в исследовательских целях сумел создать первый в мире ЛА тяжелее воздуха. Прошло более 250 лет и идея ученого приобретает широкое применение [7]. В лесохозяйственной практике БПЛА используются для мониторинга лесных пожаров, могут применяться при геодезических работах, для целей картографии, контроля состояния лесов и объектов лесной инфраструктуры, нахождения мест незаконной заготовки древесины и несанкционированных свалок, установления таксационных показателей древостоев, оптимизации технологий разработки лесосек, учета животных и др. [1–7]. Службой лесоохраны и МЧС БПЛА применяются для обнаружения зон очагов пожаров и определения направления их распространения, а Министерством обороны – в основном для разведывательных целей и решения боевых задач. На следующем этапе развития беспилотной авиации следует ожидать использования БПЛА в промышленных и лесохозяйственных целях в первую очередь как средств доставки грузов различного назначения.

При современном уровне техники и инженерной мысли создание таких ЛА представляет определенную сложность, но является выполнимой задачей [1–10, 16, 19]. «XXI век должен стать в авиации веком БПЛА – массового

развития и применения летательных аппаратов, автоматически управляемых на всех этапах движения от взлета до посадки» [18, с. 14]. Необходимость оперативной доставки грузов является очевидной и будет становиться еще острее, что потребует в ближайшем времени создания БПЛА для выполнения транспортных работ.

Экономическая целесообразность создания транспортных БПЛА должна основываться в промышленности – на интересах производства, в лесохозяйственной практике – на необходимости охраны природных лесных ресурсов, в т. ч. мониторинга лесных пожаров, оказания помощи в пожаротушении, оперативной доставки химических средств для обработки лесных массивов от вредителей, запасных частей, специального оборудования, а также грузов для жизнеобеспечения специалистов. Применение транспортных БПЛА позволит повысить эффективность промышленного освоения Арктики и Северного морского пути, охраны северных границ страны, а также геолого-разведывательных и промышленных работ в добывающей промышленности и др.

Разработка транспортных БПЛА потребует создания на борту НПС, которые должны обеспечивать полет, безопасную и точную посадку пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в месте назначения для «тяжелых» ЛА и прилет в зону работы на конечном пункте маршрута (КПМ) наземных пультов управления «легких» БПЛА [11, 13, 16].

Трудность создания БПЛА заключается именно в необходимости оснащения их НПС: требуется разработка алгоритмов управления и программно-математического обеспечения, основанных на законах прикладной математики, применительно к конструктивным особенностям и условиям эксплуатации летательных аппаратов. Оснащение двигателем, напротив, не вызовет сложностей. Здесь применимы электростатические или заряжаемые от химических генераторов на основе электролитов аккумуляторы, а также двигатели на жидком топливе [15, 17, 20].

Эскиз карты полета, параметры курса в точке старта, структурная блок-схема цифровой НПС БПЛА для лесохозяйственных работ. На рис. 1 приведен эскиз изменения углов полета БПЛА в автономном режиме и показаны параметры курса ЛА в точке старта. На рис. 2 представлена структурная блок-схема НПС БПЛА.

Результаты исследования и их обсуждение

Решение навигационных задач НПС на ЛА. Согласно карте полета ЛА, работа по доставке легких грузов с помощью НПС БПЛА заключается в следующем (рис. 1). В НПС на старте вводятся известные координаты начального пункта маршрута (НПМ) и КПМ, снятые с карты местности. Определяются заданный курс и расстояние до КПМ. На точность полета ЛА к КПМ в соответствии с заданным курсом в режиме автономного курсо-воздушного счисления влияют погрешность навигации НПС, внешние воздействия, особенности работы системы пилотирования. В результате ЛА будет находиться по данным расчета НПС в точке A_1 , где НПС производит расчет координат местоположения λ_{A_1} , φ_{A_1} , нового заданного курса Ψ_{3K2} , дальности D_2 до КПМ. По этим данным осуществляется полет ЛА.

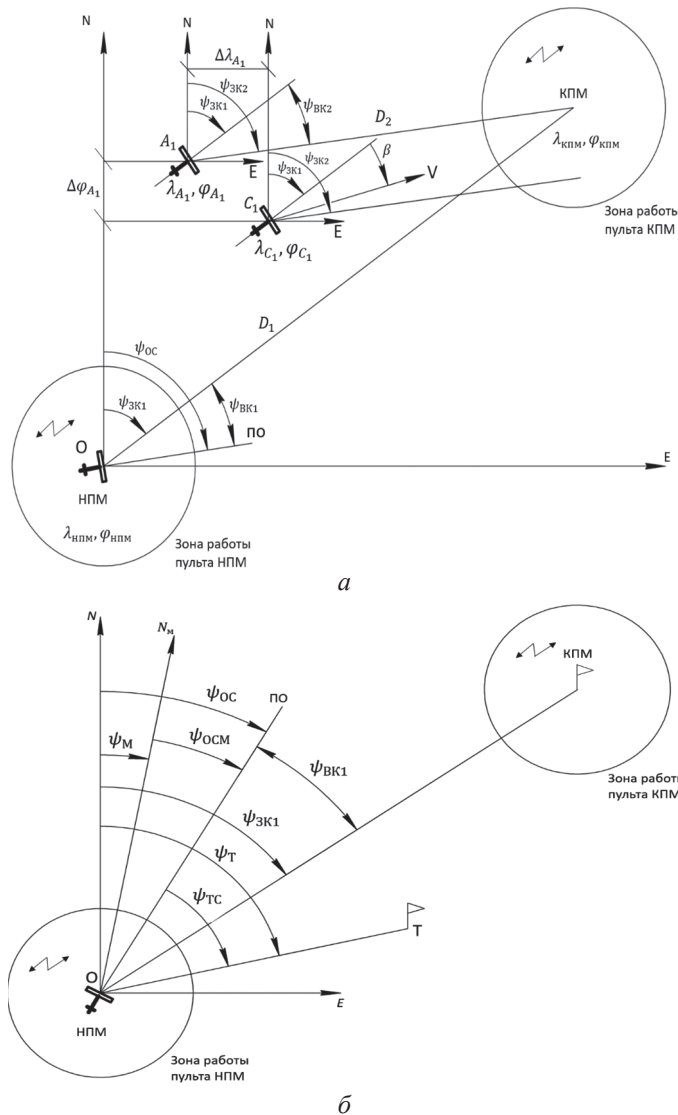


Рис. 1. Транспортный ЛА: *a* – полет с выдерживанием заданного курса; *б* – параметры курса в точке старта. Условные обозначения: β – угол сноса (град.); V – вектор скорости (м/с); ПО – продольная ось; D_1, D_2 – дальность (км); λ, φ – географические долгота и широта соответственно; A_1 – координаты в автономном полете; $\lambda_{A_1}, \varphi_{A_1}, \varphi_{зк1}$ – параметры курса воздушной навигации, $\lambda_{A_1}, \varphi_{A_1}, \Psi_{зк1} = \Psi_{тек}$ (текущий курс); C_1 – фактические координаты; $\Delta\lambda_{A_1}, \Delta\varphi_{A_1}$ – погрешности автономного полета; $\Psi_{ок}$ – стояночный курс (град.); $\Psi_{оcм}$ – стояночный магнитный курс; Ψ_M – магнитное склонение; $\Psi_{зк1}, \Psi_{зк2}$ – заданный курс; $\Psi_{вк}$ – вычисляемый курсовой угол доворота на КПМ; $\Psi_T, \Psi_{тс}$ – азимут на топографический знак Т

Fig. 1. Transport vehicle: *a* – flight with maintaining the heading; *б* – heading parameters at the starting point. Explanation of symbols: β – drift angle (deg.); V – velocity vector (m/s); ПО – longitudinal axis; D_1, D_2 – distance (km); λ, φ – longitude and latitude, respectively; A_1 – coordinates in autonomous flight; $\lambda_{A_1}, \varphi_{A_1}, \varphi_{зк1}$ – air navigation heading parameters, $\lambda_{A_1}, \varphi_{A_1}, \Psi_{зк1} = \Psi_{тек}$ (current heading); C_1 – actual position; $\Delta\lambda_{A_1}, \Delta\varphi_{A_1}$ – autonomous flight error; $\Psi_{ок}$ – ramp heading (deg.); $\Psi_{оcм}$ – ramp magnetic heading; Ψ_M – magnetic declination; $\Psi_{зк1}, \Psi_{зк2}$ – set heading; $\Psi_{вк}$ – calculated heading angle of additional turn to FDP; $\Psi_T, \Psi_{тс}$ – azimuth to the topographic symbol T

Фактическое местоположение ЛА из-за ошибок курсо-воздушного счисления окажется в точке C_1 с погрешностями по координатам $\Delta\lambda_{A1}$, $\Delta\varphi_{A1}$. В данных условиях НПС должна обеспечить прилет ЛА в зону работоспособности пульта – КПМ – для выполнения посадки в режиме радиоуправления. На точность прилета ЛА в КПМ влияют внешние атмосферные условия, радиус действия радиоуправления от пульта КПМ, время полета, погрешность навигации и особенности работы системы пилотирования ЛА. Такой режим напоминает полет снаряда «за горизонт» по заданному курсу, успешно применяемый в дальнобойной артиллерии [14].

При значительных величинах дальности D_1 точность прилета ЛА с грузом в КПМ можно повысить за счет использования в составе НПС приемника спутниковой навигационной системы – GPS/ГЛОНАСС, подключаемого к вычислителю (БЦВМ) НПС. Это позволит даже при кратковременной коррекции координат гарантировать точный прилет ЛА в КПМ.

Состав, структурная блок-схема НПС. Описание работы. НПС транспортного ЛА содержит аппаратуру, соответствующую блокам, указанным на схеме рис. 2.

Работа с НПС на борту ЛА заключается в следующем. При подготовке к полету БВК устанавливают с помощью реперных штырей на реперные отверстия ЛА, обеспечивая при этом совмещение продольных осей БВК и ЛА. Конструктивно обеспечивается также совмещение нулевого значения угла датчика курса, устанавливаемого на БВК, и нулевого значения продольной оси БВК [12, 19].

В качестве датчика стояночного курса могут использоваться магнитный компас, буссоль или оптический (использующий ориентир Т) пеленгатор со шкалой курса или датчиком курса с цифровым или аналоговым (СКТ) выходом.

На старте измеренное БВК значение начального стояночного магнитного курса ЛА (например, показание шкалы магнитного компаса) вводится в блок ЗК/ЗМС, где с учетом магнитного склонения формируется сигнал начального стояночного курса $\Psi_{OC} = \Psi_{OCM} + \Psi_M$. От ЗК/ЗМС он поступает на 1-й вход ГН и обрабатывается от исходного нулевого значения, соответствующего направлению продольной оси ЛА. После, при известном заданном курсе на КПМ, вычисляется курсовой угол доворота ЛА на заданный курс КПМ и вводится с выхода ЗК/ЗМС на 1-й вход ГН, т. е. $\Psi_{BK1} = \Psi_{ЗК1} - (\Psi_{OCM} + \Psi_M) = \Psi_{ЗК1} - \Psi_{OC}$ (см. рис. 1, б), а затем с выхода ГН значение поступает на 2-й вход БЦВМ. БВК снимается с ЛА.

На 2-й вход ГН с выхода БКК вводятся сигнал широтной коррекции скорости вращения Земли $\Omega \sin \varphi$ и сигнал компенсации собственного дрейфа гироскопа – $\omega_{др}$, обеспечивающие стабильность показаний значений курса от ГН.

Запрограммированные в цифровом виде координаты НПМ и КПМ, заданные курс, скорости, высота полета, допустимые углы отклонения от авиагоризонта вводятся с выхода БПД на 3-й вход БЦВМ.

В полете посредством АТП измеряются текущие параметры транспортного ЛА: углы отклонения от авиагоризонта, воздушная скорость, барометрическая высота, высота полета от радиовысотомера, угол сноса β – и с выхода аппаратуры текущих параметров вводятся на 4-й вход БЦВМ. В БЦВМ происходят сравнение этих сигналов с заданными в БНД параметрами транспортного ЛА и сравнение заданного и текущего курса с вычисляемым курсовым углом доворота на КПМ до нулевого значения.

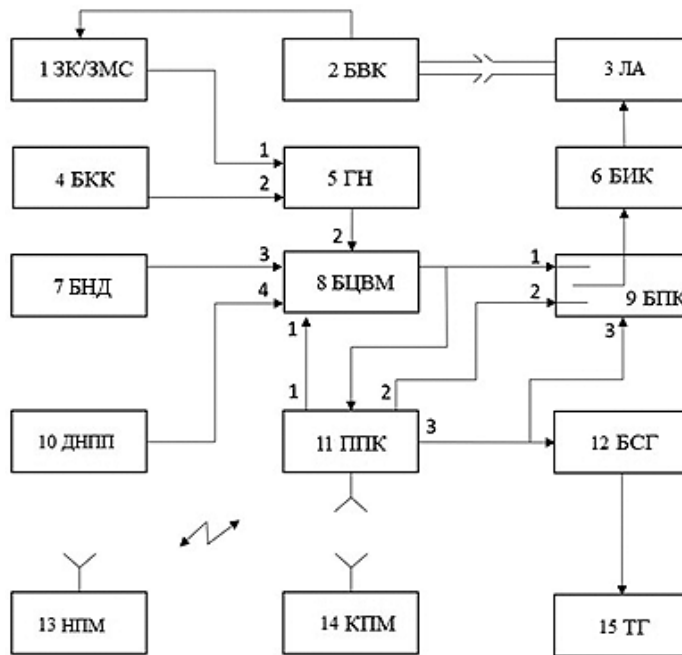


Рис. 2. Структурная блок-схема цифровой НПС транспортных БПЛА: ЗК/ЗМС – задатчик курса / магнитного склонения; БВК – съемный блок выставки начального стояночного курса; БКК – блок коррекции курса; ГН – гироскоп направления; БИК – блок исполнения команд; БНД – блок навигационных данных; БЦВМ – бортовая цифровая вычислительная машина (вычислитель); БПК – блок переключения каналов; ППК – пульт приема-передачи; БСГ – блок сброса груза; ТГ – исполнительное устройство сброса транспортируемого груза

Fig. 2. Structural flow-chart of the digital FNS of transport UAVs: ЗК/ЗМС – heading selector / magnetic declination; БВК – removable unit of the initial ramp heading display; БКК – heading correction unit; ГН – directional gyroscope; БИК – command acquisition unit; БНД – navigation data unit; БЦВМ – digital flight control computer (computer); БПК – channel-selection unit; ППК – receiving and transmitting console; БСГ – cargo drop unit; ТГ – executive device for transported cargo drop

На основании этого БЦВМ вырабатывает в цифровом виде директивные сигналы отклонений текущих параметров транспортного ЛА от заданных, которые преобразуются в директорные сигналы управления ЛА и вводятся с выхода БЦВМ на 1-й вход блока БПК. С выхода БПК данный директорный сигнал в цифровом виде поступает на вход БИК, который формирует сигналы управления, через выход БИК они вводятся в цифровую исполнительную систему управления ЛА – рулевыми тягами, закрылками и т. д. – до обнуления директорного сигнала, в т. ч. $\Psi_{\text{БК1}}$. Обнуление директорного сигнала означает, что ЛА вышел на траекторию полета по заданному курсу $\Psi_{\text{ТЕК}} = \Psi_{\text{ЗК1}}$. Из-за отклонения ЛА от запрограммированного движения по заданному курсу под действием внешних факторов, изменения в полете угла сноса β и ошибок курсо-воздуш-

ного счисления в полете необходимо корректировать текущий курс на вычисленное значение заданного курса $\Psi_{3К2}$. При этом следует иметь в виду, что фактическое местонахождение ЛА будет отличаться от расчетного (см. рис. 1, а).

В зоне работы пультов управления НПМ и КПМ команда на переход управления по каналам радиосвязи передается с пультов НПМ или КПМ на вход ППК. С 1-го выхода ППК команда поступает на 1-й вход БЦВМ и с 3-го выхода ППК – на 3-й вход БПК. При этом БПК переключает управление с выхода БЦВМ, связанного с 1-м входом БПК, на 2-й вход БПК, связанный со 2-м выходом ППК. Одновременно с выхода БЦВМ на вход ППК поступают сигналы управления и координаты, автономно вычисленные при полете по маршруту. После чего команды управления от пультов НПМ или КПМ идут по каналу радиосвязи на ППК и поступают со 2-го выхода ППК через 2-й вход БПК, далее – с выхода БПК на вход БИК и с выхода БИК – на цифровую систему управления ЛА для выполнения полета и посадки в точке КПМ. При этом сигнал сброса груза поступает с 3-го выхода ППК на вход БСГ, а с его выхода – на вход исполнительного устройства ТГ с выдачей разовой команды на сброс транспортируемого груза.

Заключение

В промышленности на практике особое значение придается надежности и безопасности работы транспорта и входящего в его состав оборудования. Большую роль играет выбор состава бортового оборудования: его стоимость, гарантированная точность, простота обслуживания и автономность работы. Исходя из этих требований предложенная структурная блок-схема навигационно-пилотажной системы является наиболее оптимальной для проведения хозяйственных мероприятий в лесной зоне.

Одноканальная структурная схема на основе использования гироскопа направления, магнитного курса, заимствованные серийно применяемые комплектующие изделия, простота технического обслуживания, радиоуправление на начальном и конечном пунктах маршрута, цифровая вычислительная техника позволяют реализовать создание навигационно-пилотажной системы транспортного беспилотного летательного аппарата для применения в лесохозяйственной практике. Основное назначение транспортных беспилотных летательных аппаратов с навигационно-пилотажной системой – доставка технических и химических средств, продовольствия и пр. для специалистов, работающих в лесохозяйственной зоне. Возможность автономного автоматического полета вне зоны действия радиоуправления на начальном и конечном пунктах маршрута позволит применять транспортные беспилотные летательные аппараты с навигационно-пилотажной системой для мониторинга лесных пожаров на значительной территории, выполнения работ по картографированию, геологоразведке, для контроля качества лесных массивов, защиты их от незаконной вырубki и др.

Для двигателей таких летательных аппаратов могут использоваться электрoзарядные аккумуляторы или заряжаемые от химических генераторов на основе электролитов с достаточной емкостью заряда (при работах в полевых условиях), а также двигатели на жидком топливе. Главное, чтобы выполнялись требования по качеству и надежности. Сложность создания беспилотных ле-

тательных аппаратов в значительной степени заключается в необходимости разработки навигационно-пилотажных систем: алгоритмов управления и программно-математического обеспечения, основанных на законах прикладной математики, применительно к конструктивным особенностям и условиям эксплуатации летательных аппаратов. Основой для разработки навигационно-пилотажной системы транспортных беспилотных летательных аппаратов являются объективные возможности инженерной науки и техники. Целесообразность выпуска подобных летательных аппаратов очевидна: существует необходимость выполнения работ службами лесоохраны в условиях удаленности и бездорожья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Акиндейев Ю.А., Воробьев В.Г., Карчевский А.А., Магнусов В.С., Селезнев Б.В., Шихер И.С. Аппаратура измерения курса и вертикали на воздушных судах гражданской авиации. М.: Машиностроение, 1989. 344 с.

Akindeyev Yu.A., Vorob'yev V.G., Karchevskiy A.A., Magnusov V.C., Seleznev B.V., Shikher I.S. *Heading and Vertical Framework Measurement Equipment for Civil Aviation Aircraft*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1989. 344 p. (In Russ.).

2. Алексеенко Н.А. Методические вопросы картографического обеспечения природоохранной деятельности особо охраняемых природных территорий России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5: География. 2014. № 1. С. 52–57.

Alexeenko N.A. Specific Methodological Features of Cartographic Support of the Activities of Nature Protection Areas in Russia. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*, 2014, no. 1, pp. 52–57. (In Russ.).

3. Бобринский А.Н., Воронов М.А., Коришонов Н.А., Ловцова Н.В., Петров А.П., Проказин Н.Е. Правоприменение и управление в сфере использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов. М.: Всемирный банк, 2017. 274 с.

Bobrinский A.N., Voronov M.A., Korshchnov N.A., Lovtsova N.V., Petrov A.P., Prokazin N.E. *Law Enforcement and Management in the Field of Use, Protection and Reproduction of Forests*. Moscow, Vsemirnyy bank Publ., 2017. 274 p. (In Russ.).

4. Коптев С.В., Скуднева О.В. О возможностях применения беспилотных летательных аппаратов в лесохозяйственной практике // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 1. С. 130–138.

Koptev S.V., Skudneva O.V. On the Applicability of UAV in Forestry Practice. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 1, pp. 130–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.1.130>

5. Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов: моногр. Казань: РИЦ «Школа», 2015. 444 с.

Moiseev V.S. *Fundamentals of the Theory of Effective Use of Unmanned Aerial Vehicle*: Monograph. Kazan, RITs "Shkola", 2015. 444 p. (In Russ.).

6. Окорокова Н.С., Пушкин К.В., Севрук С.Д., Фармаковская А.А. Разработка схем базовых модулей типоразмерных рядов энергоустановок на основе воздушно-алюминиевых химических источников тока // Электрон. журн. «Труды МАИ». 2014. Вып. 78. С. 18.

Okorokova N.S., Pushkin K.V., Sevchuk S.D., Farmakovskaya A.A. The Development of the Basic Module Schemes for the Dimension-Type Series of Power Plants Based on the Air-Aluminum Chemical Current Sources. *Trudy MAI*, 2014, iss. 78, p. 18. (In Russ.).

7. Разработка научно-методических подходов и технологии использования беспилотных летательных аппаратов в лесном хозяйстве: отчет о науч.-исслед. работе. Пушкино, 2010. 106 с.

Development of Scientific and Methodological Approaches and Technology for the Use of Unmanned Aerial Vehicles in Forestry: Report on Scientific and Research Work. Pushkino, 2010. 106 p. (In Russ.).

8. Сечин А.Ю., Дракин М.А., Киселева А.С. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования. Ч. 2. М., 2011. Режим доступа: https://racurs.ru/upload/iblock/3b4/UAV_2.pdf (дата обращения: 20.04.22).
- Sechin A.Yu., Drakin M.A., Kiseleva A.S. *Unmanned Aerial Vehicle: Application for Aerial Photography for Mapping*. Part 2. Moscow, 2011. (In Russ.).
9. Скуднева О.В. Беспилотные летательные аппараты в системе лесного хозяйства России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 6. С. 150–154.
- Skudneva O.V. Unmanned Airborne Vehicles in the Forestry Sector of Russia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2014, no. 6, pp. 150–154. (In Russ.). http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/565/1-_bespilotnye-letatelnye-apparaty-v-sisteme-lesnogo-khozyaystva-rossii.pdf
10. Скуднева О.В., Коптев С.В., Иванцов С.В. Навигационно-пилотажная система беспилотного летательного аппарата для мониторинга лесных пожаров // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 6. С. 194–203.
- Skudneva O.V., Koptev S.V., Ivantsov S.V. Navigation and Piloting System of Unmanned Aerial Vehicle for Forest Fire Monitoring. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 6, pp. 194–203. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-6-194-203>
11. Ageev A.M., Bronnikov A.M., Bukov V.N., Gamayunov I.F. Supervisory Control Method for Redundant Technical Systems. *Journal of Computers and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, iss. 3, pp. 410–419. <https://doi.org/10.1134/S1064230717030029>
12. Geister R., Limmer L., Rippl M., Dautermann T. Total System Error Performance of Drones for an Unmanned PBN Concept. *2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS)*. Herndon, VA, IEEE, 2018, pp. 2D4-1–2D4-9. <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2018.8384845>
13. Markiewicz A., Nash L. *Small Unmanned Aircraft and the U.S. Forest Service*. Report No. DOT-VNTSC-USDA-16-06. Cambridge, MA, Volpe, 2016. 28 p.
14. Merino L., Caballero F., Martinez-de-Dios J.R., Maza I., Ollero A. An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, vol. 65, pp. 533–548. <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9560-x>
15. Ohmann J.L., Gregory M.J., Roberts H.M. Scale Considerations for Integrating Forest Inventory Plot Data and Satellite Image Data for Regional Forest Mapping. *Remote Sensing of Environment*, 2014, vol. 151, pp. 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.048>
16. Shakhtarin B.I., Shen K., Neusypin K.A. Modification of the Nonlinear Kalman Filter in a Correction Scheme of Aircraft Navigation Systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, iss. 11, pp. 1252–1258. <https://doi.org/10.1134/S1064226916110115>
17. Shen K., Neusypin K.A., Proletarsky A.V., Guo R. Technology of Error Compensation in Navigation Systems Based on the Nonlinear Kalman Filter. *Guofang Keji Daxue = Journal of National University of Defense Technology*, 2017, vol. 39(2), pp. 84–90.
18. Shen K., Selezneva M.S., Neusypin K.A., Proletarsky A.V. Novel Variable Structure Measurement Systems with Intelligent Components for Flight Vehicles. *Metrology and Measurement Systems*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 347–356. <https://doi.org/10.1515/mms-2017-0025>
19. Spicer J., Perkins A., Dressel L., James M., Chen Y.-H., De Lorenzo D.S., Enge P. The JAGER Project: GPS Jammer Hunting with a Multi-Purpose UAV Test Platform. *Proceedings of Institute of Navigation International Technical Meeting, ITM-2015*. Dana Point, CA, 2015, pp. 62–70.
20. Tewkesbury A.P., Comber A.J., Tate N.J., Lamb A., Fisher P.F. A Critical Synthesis of Remotely Sensed Optical Image Change Detection Techniques. *Remote Sensing of Environment*, 2015, vol. 160, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.006>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 536-12+630*991

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-213-225

Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода

В.И. Лисицын[✉], канд. физ.-мат. наук, доц.; ResearcherID: [AAL-8681-2021](https://orcid.org/0000-0002-2148-1988),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

М.В. Драпалюк, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAP-5563-2020](https://orcid.org/0000-0002-8029-2706),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>

Н.Н. Матвеев, д-р физ.-мат. наук, проф.; ResearcherID: [AAP-4873-2020](https://orcid.org/0000-0001-9195-9580),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; viktor-lisicyn@yandex.ru[✉], md@vglta.vrn.ru, nmtv@vglta.vrn.ru

Поступила в редакцию 07.07.20 / Одобрена после рецензирования 11.09.20 / Принята к печати 14.09.20

Аннотация. Лесная экосистема является типичным примером функционирования открытых термодинамических систем. Проанализировано изменение энтропии открытой термодинамической системы, в которой могут реализовываться следующие процессы: поглощение коротковолнового солнечного излучения – процесс дифференциации; процесс общего роста биомассы, связанный с расходом ресурсов на дыхание и конкуренцию. В результате действия этих процессов в систему поступает отрицательный поток энтропии, а в самой системе производится положительная энтропия. С ростом древостоя его биомасса достигает максимума, что соответствует стационарному состоянию в экосистеме. Показано, что согласно принципу (теореме) Пригожина удельное производство энтропии в открытой системе принимает минимальное положительное значение. При дальнейшем увеличении возраста древостоя стационарное состояние открытой термодинамической системы переходит к равновесному: биомасса насаждения уменьшается, а энтропия стремится к максимальному значению в соответствии со 2-м законом термодинамики (распад экосистемы). Анализ поведения открытой термодинамической системы положен в основу новой эколого-физиологической модели динамики роста древостоя. В предлагаемой модели используется 2 параметра: биомасса отдельного дерева и число деревьев на гектар. Для моделирования динамики роста биомассы отдельного дерева применяется балансовое уравнение Бергаланффи, которое содержит динамическое уравнение, описывающее рост особи за счет поглощения ресурса и ограничение роста за счет расхода ресурса. Уравнение, характеризующее динамику численности древостоя, вытекает из условия достижения максимума биомассы древостоя в процессе роста насаждения. Модель динамики древостоя имеет 3 независимых параметра: время наступления стационарного режима, скорость расхода ресурса, а также фактор, связывающий площадь и биомассу организма. Верификация модели проведена расчетом динамики биомассы для полных (нормальных) сосновых насаждений первых 5 бонитетов (Iб, Ia, I, II, III). Качество модели оценивается безразмерным критерием эффективности Нэша–Сатклиффа, значение которого, как правило, больше 0,95, что соответствует описанию данных, близкому к идеальному.

Ключевые слова: лесная экосистема, термодинамика неравновесных процессов, моделирование динамики роста древостоя, таблицы хода роста, эколого-физиологическая модель

Для цитирования: Лисицын В.И., Драпалюк М.В., Матвеев Н.Н. Моделирование динамики хода роста древостоев на основе термодинамического подхода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 213–225. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>

Original article

Modeling the Forest Stand Growth Dynamics Based on the Thermodynamic Approach

Viktor I. Lisitsyn[✉], *Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [AAL-8681-2021](https://orcid.org/0000-0002-2148-1988), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2148-1988>

Michael V. Drapalyuk, *Doctor of Engineering, Prof.;* *ResearcherID: [AAP-5563-2020](https://orcid.org/0000-0002-8029-2706),*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-2706>

Nikolai N. Matveev, *Doctor of Physics and Mathematics, Prof.;*

ResearcherID: [AAP-4873-2020](https://orcid.org/0000-0001-9195-9580), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9195-9580>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; viktor-lisitsyn@yandex.ru[✉], md@vglta.vrn.ru, nmtv@vglta.vrn.ru

Received on July 7, 2020 / Approved after reviewing on September 11, 2020 / Accepted on September 14, 2021

Abstract. The forest ecosystem is a common example of the functioning of open thermodynamic systems. The work analyzes the change in the entropy of an open thermodynamic system where the following processes can be realized: absorption of short-wave solar radiation – differentiation process; total biomass growth process associated with the consumption of resources for respiration and competition. As a result of these processes, the negative entropy flow enters the system, and the positive entropy is produced in the system. As the stand grows, its biomass reaches a maximum, which corresponds to the steady state in the ecosystem. It is shown that, in accordance with the Prigogine’s theorem, the specific entropy production in an open system takes on a minimum positive value. With a further increase in the age of the stand, the steady state of the open thermodynamic system evolves to an equilibrium state, at which a decrease in the plant biomass is observed, and the entropy tends to a maximum value in accordance with the 2nd law of thermodynamics (ecosystem decay). The analysis of the behavior of an open thermodynamic system forms the basis of a new ecological and physiological model of the stand growth dynamics. The model proposed uses the following parameters: the biomass of an individual tree and the number of trees per hectare. In order to model the biomass growth dynamics of an individual tree, the von Bertalanffy equation is used. It contains a dynamic equation describing growth of an individual due to resource uptake and limitation of growth due to resource consumption. The equation that characterizes the dynamics of stand size derives from the condition of reaching the maximum biomass of the stand during the stand’s growth. In general, the stand’s dynamics model has only three independent parameters. They are the onset time of the steady state, the resource consumption rate and the factor linking the area and biomass of the organism. The model verification is presented by calculating the biomass dynamics for full (normal) pine plantations of the first five quality classes (Ib, Ia, I, II, III). The model’s quality is assessed by the dimensionless Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient, the value of which is usually greater than 0.95. This corresponds to a description of the data that is close to ideal.



Keywords: forest ecosystem, thermodynamics of nonequilibrium processes, forest stand growth dynamics modeling, yield tables, ecological and physiological model

For citation: Lisitsyn V.I., Drapalyuk M.V., Matveev N.N. Modeling the Forest Stand Growth Dynamics Based on the Thermodynamic Approach. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 3, pp. 213–225. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-213-225>

Введение

Современные эколого-физиологические модели [4, 6, 7, 8, 13, 14, 18, 20] не могут в полной мере описать все особенности развития древостоев, в частности немонотонную динамику роста в старших возрастах [5]. М.Д. Корзухиным [5] было проведено подробное исследование немонотонной динамики на базе данных Государственного лесного реестра. Причем ученым отмечено, что «высокое качество описания всех 1326 кривых не исключает других вариантов описания немонотонной динамики» [5, с. 112]. В работах [1, 11] термодинамически обоснована мера состояния экосистемы, называемая авторами биологическим возрастом экосистемы, и указана причина сохранения геометрической формы организма. Эта особенность важна при построении модели динамики хода роста древостоев.

Цель исследования – построение новой эколого-физиологической модели динамики хода роста древостоев на базе термодинамической теории неравновесных процессов.

Мы рассматриваем полученные результаты в качестве фундаментального подхода к обозначенной проблеме. Этот подход, основанный на термодинамике открытых систем, является необходимым этапом при выработке дальнейших конкретных рекомендаций по практическому использованию наших результатов.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются структура лесных массивов, их взаимодействие с окружающей средой и описание механизма динамики роста древостоев уравнениями неравновесной термодинамики.

Основной метод исследования – применение теории неравновесных процессов к термодинамике открытых систем, ярким примером которых являются лесные насаждения. При этом используются дифференциальные уравнения, описывающие динамику роста древостоев.

Одно из самых важных понятий термодинамики необратимых процессов – понятие стационарного состояния [3, 12]. В отличие от изолированных систем, при протекании необратимых процессов приближающихся к состоянию термодинамического равновесия, открытые системы могут достигать не равновесного, а стационарного состояния, в котором макроскопические процессы не прекращаются, а идут с постоянной скоростью. Причем постоянство термодинамических параметров достигается благодаря неизменному потоку и оттоку вещества и энергии.

Рассмотрим изменение энтропии S открытой системы. Оно состоит из потока энтропии, следующего в систему извне (чаще всего в виде энтропии,

переносимой электромагнитным излучением Солнца), $d_e S$ и потока энтропии, производимой внутри системы, $d_i S$. Согласно 2-му закону термодинамики поток энтропии внутри системы всегда положителен. Итак, в открытой термодинамической системе возможны 3 варианта:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_e S}{dt} + \frac{d_i S}{dt} > 0; \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_e S}{dt} + \frac{d_i S}{dt} < 0; \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_e S}{dt} + \frac{d_i S}{dt} = 0, \quad (3)$$

где t – время.

В случае (1) происходит деградация системы, в случае (2) в системе увеличивается порядок и растет биомасса, в случае (3) уравнение соответствует стационарному процессу, для которого возможен баланс энергий и баланс энтропии. Для нашей ситуации важны как 2-й, так и 3-й варианты, когда в открытой системе при росте организма будут существовать по крайней мере 2 процесса: процесс, сопровождающийся поглощением коротковолнового электромагнитного излучения (процесс дифференциации), и процесс, сопровождающийся общим ростом биомассы и расходом ресурса вследствие затрат на дыхание, конкуренцию и т. п.

Для изучения процессов, связанных с изменением энтропии в открытой системе, рассмотрим поведение удельной энтропии, т. е. энтропии, отнесенной к единице биомассы древостоя,

$$\sigma = \frac{S}{M}, \quad (4)$$

где M – биомасса насаждений.

Тогда для изменения энтропии имеем:

$$\frac{dS}{dt} = M \frac{d\sigma}{dt} + \sigma \frac{dM}{dt}. \quad (5)$$

С другой стороны, в соответствии с (2) и (3) получаем:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} - \left| \frac{d_e S}{dt} \right|. \quad (6)$$

Поглощение энергии Солнца пропорционально площади поглощающей поверхности F , т. е. поток энергии в систему пропорционален площади поглощающей поверхности [8, 11, 18]:

$$\left| \frac{d_e S}{dt} \right| = bF, \quad (7)$$

а поток энтропии внутри системы пропорционален образовавшейся биомассе:

$$\frac{d_i S}{dt} = \alpha(t)M, \quad (8)$$

где b – постоянная; $\alpha(t)$ – неизвестная функция, имеющая смысл удельного производства энтропии, $\alpha(t) = \frac{1}{M} \cdot \frac{d_i S}{dt}$.

С учетом (5), (7) и (8)

$$M \frac{d\sigma}{dt} + \sigma \frac{dM}{dt} = \alpha(t)M - bF. \quad (9)$$

Биомасса и площадь поверхности связаны соотношением [5]:

$$F = gM^q, \quad (10)$$

где g и q – аллометрические параметры.

На рис. 1 приведена зависимость биомассы насаждения от возраста для нормального (полного) древостоя сосны Ia класса бонитета [9]. Из зависимости видно, что в определенный период развития древостоя его биомасса достигает максимума, после чего начинает плавно уменьшаться (такая зависимость является типичной для многих насаждений [5, 16]).

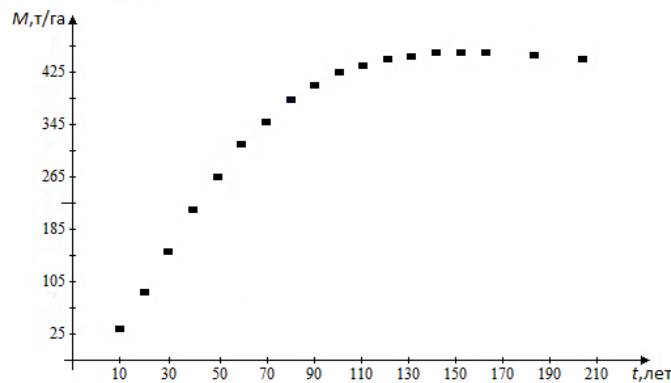


Рис. 1. Зависимость биомассы насаждения от возраста для нормального (полного) древостоя сосны Ia класса бонитета

Fig. 1. Dependence of the plantation biomass on age for a normal (complete) pine stand of the Ia quality class

Наличие такого максимума свидетельствует о достижении системой состояния, при котором $dM/dt = 0$ при $t = t_{\max}$. На рис. 1 максимальная биомасса насаждения $M_{\max} = 450,4$ т/га достигается при $t_{\max} = 160$ лет. Тогда уравнение (9) принимает вид

$$M \frac{d\sigma}{dt} = \alpha(t)M - bgM^q.$$

Достижение максимальной биомассы говорит о переходе системы в стационарное состояние, при котором $d\sigma/dt = 0$ (вариант (3) изменения энтропии). Тогда для удельного производства энтропии имеем:

$$\alpha(t_{\max}) = bgM_{\max}^{q-1}.$$

Параметр q изменяется в пределах $0 < q < 1$ [2, 5]. Из приведенного уравнения следует, что удельное производство энтропии достигает минимального положительного значения. Это находится в полном соответствии с принципом (теоремой) Пригожина [3, 12, 14, 17].

Отметим, что при доказательстве теоремы Пригожина [3] используются линейные законы и соотношение взаимности Онзагера, т. е. теорема Пригожина справедлива для линейных необратимых процессов при неизменных внешних параметрах. Однако это утверждение не является необходимым условием появления стационарного состояния. Если изменение внешних параметров

происходит медленнее, чем изменение параметров системы, то может наступить стационарное состояние системы. В этом случае понятие стационарного состояния справедливо для любых необратимых процессов и предполагает существование 2 масштабов времени протекания процессов, причем переход к состоянию равновесия распадается на 2 этапа: появление стационарного состояния и его эволюция к равновесному состоянию [3].

Далее рассмотрим трансформацию стационарного состояния при $t > t_{\max}$ в равновесное, при котором будет соблюдаться баланс энергии, т. е. мы сможем воспользоваться балансовой гипотезой, лежащей в основе модели Берталанффи [19]. Для этого общую биомассу насаждения представим в виде

$$M = mN,$$

где m – биомасса, приходящаяся в среднем на одно дерево, а N – число деревьев на гектар насаждения. Тогда (4) примет вид

$$\sigma = \frac{M}{mN}.$$

Далее в соответствии с формулами (5)–(8), имеем:

$$\frac{dS}{dt} = M \frac{d\sigma}{dt} + \sigma \left(m \frac{dN}{dt} + N \frac{dm}{dt} \right); \quad (11)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_i S}{dt} - \left| \frac{d_e S}{dt} \right|; \quad (12)$$

$$\left| \frac{d_e S}{dt} \right| = bF; \quad (13)$$

$$\frac{d_i S}{dt} = \alpha(t) mN. \quad (14)$$

Биомасса и площадь поверхности насаждения связаны соотношением (10): $F = g(mN)^q$.

Как известно [5], для описания поведения функции m обычно используют модель Берталанффи [19], которая состоит из динамического уравнения для биомассы особи, описывающего рост за счет поглощения ресурса и ограничение роста за счет расхода ресурса:

$$\frac{dm}{dt} = fgm^q - rm, \quad (15)$$

где f – удельная скорость поглощения ресурса; r – удельная скорость расхода ресурса.

Общее решение этого уравнения хорошо известно [5] и имеет вид

$$m(t) = \left(\exp(-r(1-q)t) \left(m_0^{1-q} - \frac{p}{r} \right) + \frac{p}{r} \right)^{\frac{1}{1-q}}, \quad (16)$$

где m_0 – биомасса особи в начальный момент времени; p – параметр модели, $p = fg$; $t = t_0$.

Используя соотношения (12) – (15), из уравнения (11) получаем:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} + \frac{1}{m} (pm^{q-1} - r) = \alpha(t) - bg(mN)^{q-1}.$$

Проанализируем асимптотику данного уравнения при $t \rightarrow \infty$, т. е. при достижении системой термодинамического равновесного состояния. В этом случае имеем следующее. Число деревьев уменьшается до минимального (в пределе до нуля), так, что

$$\frac{dN}{dt}(t \rightarrow \infty) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} (pm^{g-1} - r) = 0, \text{ т.к. } \lim_{t \rightarrow \infty} m^{g-1} = \frac{r}{p},$$

удельная энтропия $\sigma(t) \rightarrow \sigma_\infty$ стремится к постоянному значению, поэтому производной $d\sigma/dt$ можно пренебречь. Тогда, для удельного производства энтропии получаем:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \alpha(t) = \frac{br}{f} N_\infty^{g-1},$$

где N_∞ – предельное (минимальное) число деревьев.

Вспоминая, что показатель степени меньше 1, имеем для производства энтропии максимальное значение α_{\max} . Поскольку энтропия при этом является монотонной функцией, она тоже достигает максимума в соответствии со 2-м законом термодинамики. Так завершается процесс эволюции открытой системы – биоценоза. Достижение максимальной энтропии маркирует процесс распада системы, вследствие которого биомасса насаждения начинает уменьшаться.

Результаты исследования и их обсуждение

Построим эколого-физиологическую модель динамики древостоя. Отправным пунктом построения модели является тот факт, что биомасса насаждения достигает своего максимума в некоторый момент времени t_{\max} . Это означает, что прирост биомассы для этого момента времени равен нулю:

$$\frac{dM(t_{\max})}{dt} = 0,$$

или

$$m \frac{dN}{dt} + N \frac{dm}{dt} = 0,$$

из последнего равенства получаем:

$$\frac{dN(t_{\max})}{dt} = -\frac{1}{m(t_{\max})} \cdot \frac{dm(t_{\max})}{dt} \cdot N(t_{\max}).$$

Полагаем, что изменение численности древостоя будет проходить в соответствии с этой формулой, т. е. она будет описывать динамику численности при любых t , а не только для t_{\max} . В целях установления аналитического вида зависимости числа деревьев от времени необходимо решить следующее уравнение:

$$\frac{dN(t)}{dt} = (-fgm^{g-1} + r) \cdot N(t), \quad (17)$$

в котором функция $m(t)$ определена в соответствии с выражением (16), т. е. является общим решением уравнения Бергаланффи.

Введем следующие обозначения:

$$c_1 = m_0^{1-q} - \frac{fg}{r}; \quad c_2 = \frac{fg}{r}; \quad c_1 = m_0^{1-q} - c_2;$$

$$a = r(1-q); \quad p = \frac{r}{a}; \quad p = \frac{1}{1-q}; \quad c_2 = m_\infty^{\frac{1}{p}},$$

где c_1, c_2, a – параметры нашей модели.

Решение уравнения (17) с учетом принятых обозначений имеет вид

$$N(t) = N_0 \frac{(c_2 + c_1)^p}{(c_2 + c_1 \exp(-at))^p},$$

где N_0 – число деревьев при $t = t_0 = 0$, принимаемое в качестве исходного.

Для функции $m(t)$ получаем:

$$m(t) = (c_2 + c_1 \exp(-at))^p.$$

В целях дальнейшего анализа выражений введем новую константу:

$$\beta = \frac{c_1}{c_2} = \frac{rm_0^{1-q}}{fg} - 1.$$

Тогда выражения для числа деревьев и биомассы, приходящейся на одно дерево, примут вид

$$N(t) = N_0 \frac{(1 + \beta)^p}{(1 + \beta \exp(-at))^p};$$

$$m(t) = m_\infty (1 + \beta \exp(-at))^p.$$

Для биомассы насаждения $M(t)$ имеем:

$$M(t) = N(t)m(t) = N_0 (1 + \beta)^p m_\infty = \text{const}.$$

Таким образом, получаем, что биомасса насаждения является постоянной величиной, не зависящей от времени. Данный вывод не соответствует действительности, но и не является парадоксом, так как в выражении для динамики числа деревьев использовались те же параметры модели, что и для динамики биомассы отдельного дерева. Динамика изменения у них разная, хотя и значения параметров могут быть близкими. Обозначим эти параметры для числа деревьев индексами «1» – α_1, β_1, p_1 , для биомассы оставим без индексов – α, β, p . Параметры c_1 и c_2 по-прежнему относятся к биомассе отдельного дерева. Изменяются не только индексы, но и сами значения этих параметров. Тогда биомасса насаждения зависит от времени. Для нее получаем следующее выражение:

$$M(t) = N(t)m(t) = N_0 (1 + \beta_1)^{p_1} m_\infty \frac{(1 + \beta \exp(-at))^p}{(1 + \beta_1 \exp(-a_1 t))^{p_1}}.$$

Сохраняем требование равенства нулю производной биомассы в момент времени t_{\max} . Имеем следующее соотношение:

$$\frac{dM(t_{\max})}{dt} = \left(\frac{p_1 a_1 \beta_1}{\beta_1 + \exp(a_1 t_{\max})} - \frac{pa\beta}{\beta + \exp(at_{\max})} \right) = 0.$$

Вспоминая, что $p = r/a$, $p_1 = r_1/a_1$ и смысл параметра r , естественно положить $r = r_1$, так как скорость потребления ресурса остается одной и той же для данного древостоя. Решая приведенное уравнение относительно t_{\max} , получаем:

$$t_{\max} = \frac{1}{a - a_1} \cdot \ln \frac{\beta}{\beta_1}. \quad (18)$$

Время, определенное по этой формуле, может быть как меньше фактического, так и больше времени, при котором биомасса насаждения достигает максимума. Данный факт интерпретируется следующим образом: стационарный режим в открытой системе не фиксируется строгим моментом времени, он длится определенный период и часто наступает несинхронно с достижением максимальной биомассы, после чего насаждение плавно эволюционирует к равновесному состоянию. В дальнейшем момент времени, найденный по формуле (18), будем называть временем наступления стационарного режима – t_{st} . Параметры модели β_1 и β определяются по начальным (m_0 , N_0) и конечным (m_∞ , N_∞) значениям из следующих соотношений:

$$\beta_1 = \left(\frac{N_\infty}{N_0} \right)^{1-q_1} - 1; \quad \beta = \left(\frac{m}{m_\infty} \right)^{1-q} - 1.$$

Полагая, что $q_1 = q + \Delta q$, из соотношения (18) получаем следующее трансцендентное уравнение для определения Δq :

$$\left(\frac{m_0}{m_\infty} \right)^{1-q} - \left(\frac{N_\infty}{N_0} \right)^{1-q_1} = t_{st} \Delta q r \left(\left(\frac{m_0}{m_\infty} \right)^{1-q} - 1 \right).$$

Таким образом, модель динамики древостоя имеет 3 независимых параметра: время наступления стационарного режима, скорость расхода ресурса и фактор (q), связывающий площадь и биомассу организма. Эти параметры находятся посредством процедуры оптимизации. Независимыми параметрами модели можно считать и предельные значения m_∞ и N_∞ .

Для верификации модели использованы модальные таблицы хода роста А.З. Швиденко и др. [10] для полных (нормальных) сосновых насаждений первых 5 бонитетов (Iб, Ia, I, II, III). Из таблиц взяты данные по числу деревьев на гектар и фитомассе насаждения на гектар.

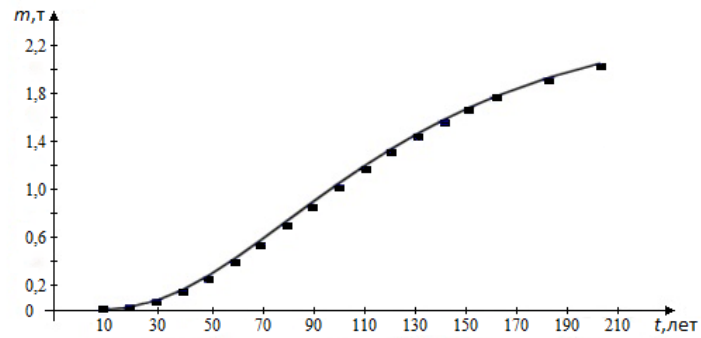
Фитомасса отдельного дерева была получена делением фитомассы насаждения на число деревьев.

Минимизация среднеквадратичного отклонения проводилась для параметров t_{st} , r . В качестве независимого параметра выбиралось значение m_∞ , тогда как соответственное значение N_∞ определялось из условия

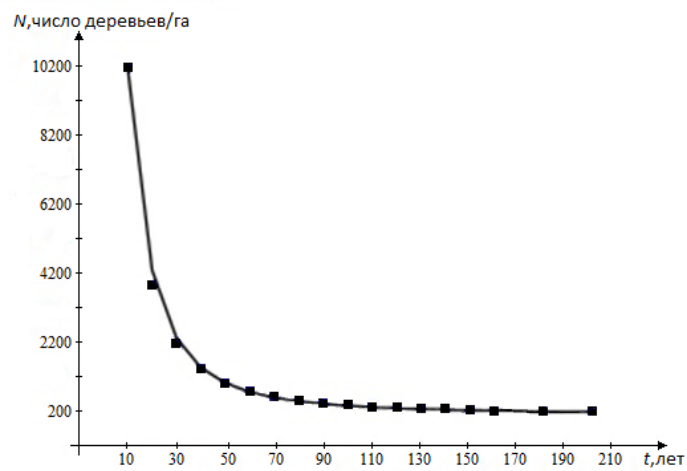
$$N_\infty = \frac{M^*}{m_\infty},$$

где M^* – биомасса насаждения для граничного времени в таблицах динамики биологической продуктивности сосновых насаждений (для соснового насаждения M^* выбиралось при $t = 200$ лет).

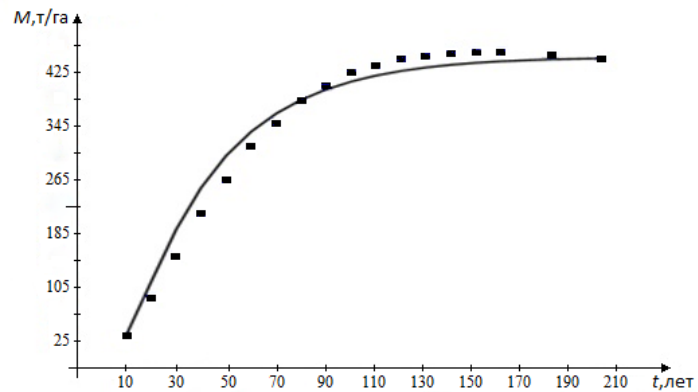
Параметр q для всех бонитетов соснового насаждения оказался равным 0,7. Этот факт находится в согласии с результатами работ [1, 2]. Данные расчетов приведены на рис. 2 и в таблице.



a



б



в

Рис. 2. Зависимости показателей соснового насаждения Ia класса бонитета от времени: *a* – биомассы на одно дерево; *б* – числа деревьев; *в* – общей биомассы насаждения. (индекс 1 относится к рассчитанным по модели, ■ – эмпирические данные взяты из [10])

Fig. 2. Dependences of parameters of a pine stand of the Ia quality class on time: *a* – biomass per tree; *б* – number of trees; *в* – total biomass of the stand. Index 1 refers to those calculated using the model, ■ – empirical data are taken from [10]

**Параметры модели критерия эффективности
Нэша–Сатклиффа ME в зависимости от бонитета сосновых насаждений
Parameters of the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient ME depending on
the quality of pine stands**

Бонитет	r	m_{∞}	t_{st}	ME		
				m	N	M
Iб	0,0523	2,950	180	0,9994	0,9990	0,93196
Iа	0,0510	2,365	200	0,9974	0,9978	0,97760
I	0,0470	1,950	200	0,9887	0,9975	0,97600
II	0,0440	1,580	200	0,9991	0,9984	0,95980
III	0,0380	1,090	200	0,9971	0,9980	0,95720

Качество модели оценивается безразмерным критерием эффективности Нэша–Сатклиффа ME [15] (критерий традиционно используется в экологических моделях):

$$ME = 1 - \frac{\sum_k (Y_k^{\text{emp}} - Y_k)^2}{\sum_k (Y_k^{\text{emp}} - Y_{\text{mean}})^2},$$

где Y_k^{emp} – эмпирические данные для конкретной величины из таблиц; Y_k – расчетные данные по модели для тех же моментов времени; Y_{mean} – среднее значение той же величины.

Значение ME может находиться в широких пределах $(-\infty, 1)$. Причем 1 – соответствует идеальному описанию данных модели; 0 – качеству описания, совпадающему со средним значением; $ME < 0$ – непригодности данной модели.

Отличие рассчитанных по модели данных от соответствующих эмпирических данных в абсолютных значениях не превышает нескольких процентов. Например, для возрастов больше 90 лет не превышает 2–3 %.

Заключение

Скорость расхода ресурса монотонно убывает с ростом бонитета: условия произрастания ухудшаются и скорость потребления ресурса падает. То же относится к конечной биомассе древостоя. Данный параметр больше биомассы для древостоя 200-летнего возраста, но коррелирует с соответствующими эмпирическими значениями. Время установления стационарного режима, как правило, больше времени, при котором биомасса насаждения достигает максимума. Это еще раз говорит о том, что процесс движения древостоя к стационарному режиму растянут во времени. Не приведены результаты расчета аллометрического параметра Δq . Эти результаты носят в основном методический характер, но при достижении оптимальных значений других параметров модели они для всех бонитетов находятся в районе 0,02, что является малой по величине поправкой, но очень существенной для расчета числа деревьев. Данные по критерию эффективности говорят о применимости предложенной модели для лесоводческой практики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александров Г.А., Голицын Г.С. Критерий подобия для роста лесных насаждений // Докл. АН. 2012. Т. 446, № 1. С. 110–113.
Alexandrov G.A., Golitsyn G.S. A Similarity Criterion for the Forest Stand Growth. *Doklady Akademii nauk = Doklady Biological Sciences*, 2012, vol. 446, no. 1, pp. 110–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0012496612050018>
2. Волькенштейн М.В. Биофизика. М.: Наука, 1988. 592 с.
Volkenstein M.V. *Biophysics*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 592 p. (In Russ.).
3. Зотин А.И. Термодинамический подход к проблемам развития, роста и старения. М.: Наука, 1974. 184 с.
Zotin A.I. *Thermodynamic Approach to the Problems of Development, Growth and Aging*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 184 p. (In Russ.).
4. Карев Г.П. Системное моделирование лесных сообществ // Сиб. экол. журн. 2001. № 4. С. 518–528.
Karev G.P. System Modeling of Forest Communities. *Sibirskij ecologiccheskij zhurnal = Siberian Journal of Ecology*, 2001, no. 4, pp. 518–528. (In Russ.).
5. Корзухин М.Д. Построение кривых хода роста древостоев на основе обобщенной модели Бергаланфи по данным государственного лесного реестра // Лесоведение. 2019. № 2. С. 105–114.
Korzukhin M.D. Generalized von Bertalanffy's Model Applied to Yield Curve Calculation Based on the State Forest Inventory Data. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 2019, no. 2, pp. 105–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819020049>
6. Корзухин М.Д., Семевский Ф.Н. Синэкология леса. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 192 с.
Korzukhin M.D., Semevskiy F.N. *Synecology of Forest*. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992. 192 p. (In Russ.).
7. Лисицын В.И. Эколого-физиологическая модель динамики роста однопородного древостоя // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 1(27). С. 213–215.
Lisitsyn V.I. An Ecological and Physiological Model of the Dynamics of Growth of One-Species Tree Stands. *Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy xxi veka: teoria i praktika = Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2017, vol. 5, no. 1(27), pp. 213–215. (In Russ.).
8. Лисицын В.И., Мусиевский А.Л., Сериков М.Т. Математическое моделирование и оптимизация роста смешанных насаждений // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса. Воронеж: ВГЛТА, 1997. С. 139–143.
Lisitsyn V.I., Musiyevskiy A.L., Serikov M.T. Mathematical Modeling and Optimization of Growth of Mixed Plantations. *Mathematical Modelling, Computer Optimization of Technologies, Equipment Parameters and Control Systems of the Forest Sector*. Voronezh, VGLTA Publ., 1997, pp. 139–143. (In Russ.).
9. Саушкин В.В., Матвеев Н.Н., Постников В.В., Камалова Н.С., Лисицын В.И., Евсикова Н.Ю., Жужукин К.В., Нгуен Хоай Тхьонг. Исследование влияния импульсного магнитного поля и адсорбированной воды на свойства древесины методом инфракрасной спектроскопии // Лесотехн. журн. 2018. Т. 8, № 2(30). С. 222–232.
Saushkin V.V., Matveev N.N., Postnikov V.V., Kamalova N.S., Lisitsyn V.I., Evsikova N.Yu., Zhuzhukin K.V., Nguen H.T. Investigation of the Influence of Pulse Magnetic Field and Adsorbed Water on the Properties of Wood by the Method of Infrared Spectroscopy. *Lesotekhnicheskiy zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2018, vol. 8, no. 2(30), pp. 222–232. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_5b24061b468a19.01199073

10. Швиденко А.З., Щепашченко Д.Г., Нильсон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии: (нормативно-справочные материалы). Изд. 2-е. М.: Рослесхоз, Междунар. ин-т приклад. систем. анализа, 2008. 886 с.

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'son S., Buluy Yu.I. *Tables and Models of Yield and Biological Productivity of the Main Forest-Forming Species Stands of Northern Eurasia: (Regulatory and Reference Materials)*. Moscow, Rosleskhoz Publ., 2008. 886 p. (In Russ.).

11. Alexandrov G.A., Golitsyn G.S. Biological Age from the Viewpoint of Thermodynamic Theory of Ecological Systems. *Ecological Modelling*, 2015, vol. 313, pp. 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.022>

12. Jorgensen S.E., Svirezhev Y.V. *Towards a Thermodynamic Theory for Ecological Systems*. Oxford, Elsevier, 2004. 366 p.

13. Landsberg J. Modelling Forest Ecosystems: State of the Art, Challenges, and Future Directions. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, vol. 33, no. 3, pp. 387–395. <https://doi.org/10.1139/x02-129>

14. Larocque G.R. Forest Models. *Encyclopedia of Ecology*. Ed. by S.E. Jørgensen, B.D. Fath. Amsterdam, Elsevier, 2008, pp. 1663–1673.

15. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I – a Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 1970, vol. 10, iss. 3, pp. 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

16. Ogawa K. Mathematical Consideration of the Age-Related Decline in Leaf Biomass in Forest Stands under the Self-Thinning Law. *Ecological Modelling*, 2018, vol. 372, pp. 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.01.015>

17. Prigogine I. *Etude thermodynamique des phénomènes irréversibles*. Thesis. Liège, Desoer, 1947. 143 p. (In Fr.).

18. Robinson A.P., Ek A.R. The Consequences of Hierarchy for Modeling in Forest Ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, vol. 30, no. 10, pp. 1837–1846. <https://doi.org/10.1139/x00-117>

19. Von Bertalanffy L. *Biophysik des Fließgleichgewichts*. Wiesbaden, Springer, 1953. 56 p. (In Ger.). <https://doi.org/10.1007/978-3-663-20198-4>

20. Zhang X., Cao Q.V., Wang H., Duan A., Zhang J. Projecting Stand Survival and Basal Area Based on a Self-Thinning Model for Chinese Fir Plantations. *Forest Science*, 2020, vol. 66, iss. 3, pp. 361–370. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxz086>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest