

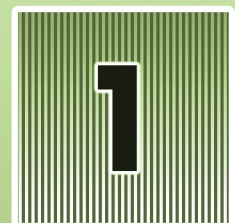
ВЕСТНИК

Поволжского государственного
технологического университета

ЛЕС

ЭКОЛОГИЯ

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ



2024



<http://www.volgatech.net/>

ВЕСТНИК

ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

СЕРИЯ «Лес. Экология. Природопользование»

1(61)
2024

январь – март

Научный журнал

Издаётся с ноября 2007 года

Выходит четыре раза в год

Журнал публикует оригинальные результаты исследований по лесному хозяйству, физико-химической биологии, а также по технологиям, материалам и оборудованию лесозаготовок, лесного хозяйства, деревообработки и химической переработки биомассы дерева.

Журнал включён в систему РИНЦ, ULRICH'S PERIODICALS DIRECTORY и ПЕРЕЧЕНЬ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 67093 от 15 сентября 2016 г.)

Полное или частичное воспроизведение материалов, содержащихся в настоящем издании, допускается только с письменного разрешения редакции.

Адрес издателя, учредителя и редакции:

424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Тел. (8362) 68-78-46, 68-28-41

Факс (8362) 41-08-72

E-mail: vestnik@volgatech.net

Редактор, корректор Т. А. Рыбалка

Дизайн обложки Л. Г. Маланкина

Компьютерная верстка

Т. В. Отмахова

Перевод на английский язык

Ж. О. Кузьминых

Подписано в печать 30.03.24.

Формат 60×84 1/8. Усл. п. л. 11,85.

Тираж 500 экз. Заказ № 1530

Дата выхода в свет: 17.05.24.

Цена свободная

Поволжский государственный

технологический университет

424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Отпечатано с готового оригинал-макета

в ООО «Вертола»

424004, Йошкар-Ола,

ул. Льва Толстого, 45

Главный редактор

Е. М. Романов, д-р с.-х. наук, профессор

Редакционный совет

Э. А. Курбанов, д-р с.-х. наук, профессор (*председатель*)

Ioannis Z. Gitas, профессор Университета Аристотеля (Салоники, Греция)

Cecil C. Konijnendijk, профессор Университета Британской Колумбии (Ванкувер, Канада)

Davide Pettenella, профессор (Университет Падуи, Италия)

В. В. Усенья, д-р с.-х. наук, профессор, акад. НАН Беларуси (Минск)

Редакционная коллегия

С. А. Денисов, д-р с.-х. наук, профессор (*зам. гл. редактора*)

В. П. Бессчётнов, д-р биол. наук, профессор (Нижегород)

О. Н. Бурмистрова, д-р техн. наук, профессор (Ухта)

Л. В. Ветчинникова, д-р биол. наук, доцент (Петрозаводск)

О. Н. Воробьёв, канд. с.-х. наук, доцент

Е. А. Гончаров, канд. с.-х. наук, доцент

Ю. П. Демаков, д-р биол. наук, профессор

(*отв. секретарь*)

Н. Н. Дубенок, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН (Москва)

Т. Л. Егوشина, д-р биол. наук, профессор (Киров)

А. В. Жигунов, д-р с.-х. наук, профессор (Санкт-Петербург)

А. В. Каверин, д-р с.-х. наук, профессор (Саранск)

М. А. Карасёва, д-р с.-х. наук, профессор

С. А. Куропат, д-р геогр. наук, профессор (Воронеж)

Д. И. Мухоморов, д-р с.-х. наук, доцент (*зам. гл. редактора*)

А. М. Носов, д-р биол. наук, профессор (Москва)

А. Н. Переволоцкий, д-р биол. наук (Москва)

А. С. Рулёв, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН (Волгоград)

В. В. Тараканов, д-р с.-х. наук, профессор (Новосибирск)

С. А. Угрюмов, д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербург)

Е. М. Царёв, д-р техн. наук, профессор

В. Л. Черных, д-р с.-х. наук, профессор

С. И. Чумаченко, д-р биол. наук, профессор (Москва)

Г. О. Османова, д-р с.-х. наук, доцент

К. П. Рукомойников, д-р техн. наук, доцент

В. И. Стурман, д-р геогр. наук, профессор (Санкт-Петербург)

Е. С. Шарапов, д-р техн. наук, доцент

О. В. Шейкина, канд. с.-х. наук, доцент

Ю. А. Ширнин, д-р техн. наук, профессор

VESTNIK

1(61)
2024

January – March

OF VOLGA STATE UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Series «Forest. Ecology. Nature Management»

Has been published since 11, 2007

Is issued 4 times a year

Academic Periodical

The original results of researches for forest management, physico-chemical biology as well as for material and equipment of forest harvesting operations, forestry, woodworking and chemical treatment of tree biomass are published in the journal.

The journal has been included in the Russian Science Citation Index (RSCI) database, ULTRICH'S PERIODICALS DIRECTORY and in the list of peer-reviewed scientific editions for publishing the essential scientific results of the theses for the degrees of Candidate and Doctor of Sciences

Founder and Publisher:

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Volga State University of Technology»

The journal is included in the register of Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications, Information Technology and Mass Communications (Certificate of registration ПИ № ФС 77 – 67093 dated 15 September, 2016)

Any use of articles without the written consent of the editorial board is strictly prohibited.

Address:

424000, Yoshkar-Ola, 3, Lenin Square

Tel. (8362) 68-78-46, 68-28-41

Fax (8362) 41-08-72

E-mail: vestnik@volgatech.net

Editor, proofreader *T. A. Rybalka*

Cover design *L. G. Malankina*

Computer assisted make up

T. V. Otmahova

Translation

Z. O. Kuzminykh

Passed for printing 30.03.24.

format 60×84 1/8. No. of press sheets 11,85

Printing run 500 copies. Order No 1530

Release date: 17.05.24.

Open price

Volga State University of Technology
424000, Yoshkar-Ola, 3, Lenin Square

Printed from the original layout

at LLC «Vertola»

424004, Yoshkar-Ola,

45, Leo Tolstoy St.

Editor-in-Chief

Evgeny M. Romanov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Editorial Board:

Eldar A. Kurbanov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor (*Chairman*)

Ioannis Z. Gitas, Professor, Aristotle University of Thessaloniki (Thessaloniki, Greece)

Cecil C. Konijnendijk, Professor (The University of British Columbia, Vancouver, Canada)

Davide Pettenella, Doctor in Science in forest policy and economics (University of Padova, Italy)

Vladimir V. Usenya, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk)

Editorial team:

Sergey A. Denisov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor (*Vice Editor-in-Chief*)

Dmitry I. Mukhortov, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor (*Vice Editor-in-Chief*)

Vladimir P. Besschetnov, Doctor of Biological Sciences, Professor (Nizhny Novgorod)

Olga N. Burmistrova, Doctor of Technical Sciences, Professor (Ukhta)

Lidia V. Vetchinnikova, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor (Petrozavodsk)

Oleg N. Vorobyov, PhD in Agriculture, Associate Professor

Evgeny A. Goncharov, PhD in Agriculture, Associate Professor

Yuriy P. Demakov, Doctor of Biological Sciences, Professor (*Executive Secretary*)

Nikolay N. Dubenok, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Member of the Russian Academy of Sciences (Moscow)

Tatiana L. Egoshina, Doctor of Biological Sciences, Professor (Kirov)

Anatoliy V. Zhigunov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor (St. Petersburg)

Aleksandr V. Kaverin, Doctor of Agricultural Sciences, Professor (Saransk)

Margarita A. Karaseva, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Semen A. Kurolap, Doctor of Geographical Sciences, Professor (Voronezh)

Aleksandr M. Nosov, Doctor of Biological Sciences, Professor (Moscow)

Aleksandr N. Perevolotsky, Doctor of Biological Sciences (Moscow)

Aleksandr S. Rulev, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Member of the Russian Academy of Sciences (Volgograd)

Vyacheslav V. Tarakanov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor (Novosibirsk)

Sergey A. Ugryumov, Doctor of Technical Sciences, Professor (St. Petersburg)

Evgeny M. Tsarev, Doctor of Technical Sciences, Professor

Valeriy L. Chernykh, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Sergey I. Chumachenko, Doctor of Biological Sciences, Professor (Moscow)

Konstantin P. Rukomoynicov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Vladimir I. Sturman, Doctor of Geographical Sciences, Professor (St. Petersburg)

Evgeny S. Sharapov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Olga V. Sheykina, PhD in Agriculture, Associate Professor

Yuriy A. Shirnin, Doctor of Technical Sciences, Professor

© Volga State University of Technology, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Колонка главного редактора

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Черных В. Л., Поваров Е. Д., Фёдоров С. В., Черных Л. В., Черных Д. В., Фомин А. С. Государственная инвентаризация лесов в Российской Федерации: изменчивость и точность определения запаса древесины

Дергунов Д. М., Воробьёв О. Н., Курбанов Э. А., Лежнин С. А., Губаев А. В. Оценка алгоритма «Случайный лес» машинного обучения для классификации фитомассы лесов

Плюха Н. И., Усольцев В. А., Цепордей И. С. Моделирование доли коры в фитомассе ветвей сосны обыкновенной в степной зоне

Тимаков А. А., Сергеев Р. В., Романов Е. М., Хусаинова А. Р., Краснов В. Г. Введение в культуру in vitro зелёных неодревесневших черенков дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) разных возрастных групп

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

Ширнин Ю. А., Ширнин А. Ю., Денисов С. А., Петухов И. В., Анисимов П. Н. Обоснование технологии лесосечных работ в горельниках с содействием естественному восстановлению сосны

Асташевский М. С., Асташевская А. А., Быковский М. А. Программа по оптимизации схем раскрытия древесного хлыста породы сосна на пиловочные брёвна

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ. БИОТЕХНОЛОГИИ

Тобо Б., Али В., Кармока Р., Махмуд А. Оценка таксационных показателей пихты киликийской в заповеднике «Пихта и Кедр» в Сирии

ДАТЫ. СОБЫТИЯ. КОММЕНТАРИИ

Рекомендации парламентских слушаний по теме «Лесное семеноводство как основа интенсификации воспроизводства лесов»

Информация для авторов

CONTENTS

5 Editor's note

FORESTRY

Chernykh V. L., Povarov E. D., Fedorov S. V., Chernykh L. V., Chernykh D. V., Fomin A. S. State Forest Inventory in the Russian Federation: Variability and Accuracy of the Growing Stock Estimation

Dergunov D. M., Vorobev O. N., Kurbanov E. A., Lezhnin S. A., Gubaev A. V. Estimation of the Random Forest Machine Learning Algorithm for Classification of Forest Phytomass

Plyukha N. I., Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Modeling the Share of the bark in the Phytomass of Branches of Scots Pine in the Steppe Zone

Timakov A. A., Sergeev R. V., Romanov E. M., Khusainova A. R., Krasnov V. G. In vitro Culture Initiation of Green Cuttings of English Oak (*Quercus Robur* L.) of Different Age Groups

55

FORESTRY TECHNOLOGIES AND MACHINES

Shirnin Yu. A., Shirnin A. Yu., Denisov S. A., Petukhov I. V., Anisimov P. N. Justification of the Technology of Logging Operations Promoting the Natural Regeneration of Pine in Burnt Areas

Astashevsky M. C., Astashevskaya A. A., Bykovsky M. A. A Program for Optimizing the Patterns of Cutting Pine Tree Length Stems into Sawlogs

76

PROBLEMS IN ECOLOGY AND RATIONAL NATURE MANAGMENT. BIOTECHNOLOGIES

Tobo B., Ali W., Karmoka R., Mahmoud A. Estimation of Kiliki fir dendrometry variables in the Shuh and Cedars Reserve of Syria

85

DATES. EVENTS. COMMENTS

Recommendations of the Parliamentary Hearings on the theme "Forest seed production as a basis for the intensification of forest regeneration"

97

101 Information for the authors

Уважаемые коллеги!

Представляем вашему вниманию первый выпуск журнала за 2024 год.

Устойчивое управление лесным сектором в любой стране невозможно без актуальных и достоверных данных о лесах. Одним из методов учёта лесных ресурсов является государственная инвентаризация лесов (ГИЛ), первый цикл которой в России завершился в 2020 году. Открывает номер статья коллектива авторов из ПГТУ и Рослесинфорга, посвящённая анализу данных о запасах древесины по материалам 57,5 тыс. постоянных пробных площадей, заложенных по методике ГИЛ, в 69 субъектах РФ. Выводы, полученные авторами, могут быть основой для пересмотра большого перечня нормативных документов, регламентирующих назначение и проведение лесохозяйственных мероприятий.

Оценка фитомассы лесных насаждений с использованием алгоритма машинного обучения «Случайный лес», выполненная коллективом авторов под научным руководством Э. А. Курбанова, показывает, что сочетание спектральных каналов Sentinel-2 и вегетационных индексов повышают точность оценки фитомассы лесных насаждений. Оценке фитомассы коры ветвей сосны обыкновенной посвящена работа учёных Уральского ботанического сада под руководством В. А. Усольцева. Авторами предложены модели процентного содержания коры в массе ветвей естественных сосняков и культур.

Вопросам биотехнологии посвящены две статьи. Статья авторов кафедры лесных культур и биотехнологии ПГТУ предлагает ознакомиться с результатами разработки методики получения первичных эксплантов дуба на основе зелёных черенков.

Статья исследователей из Костромского государственного университета знакомит читателей с выявленными особенностями активации переключения развития микроспор с гаметофитной на спорофитную программу у сортовых форм голубики от концентрации макроэлементного состава среды.

Раздел «Технологии и машины лесного дела» открывает статья, обосновывающая новую технологию заготовки лесоматериалов в товарных горельниках сосны, обеспечивающую сохранение семенного материала для естественного возобновления сосны. Во второй статье представлен метод оптимизации раскряжёвки древесного хлыста. Использовано имитационное моделирование процесса раскряжывания хлыстов на сортименты с учётом входных и выходных факторов. Предлагаемый метод оптимизации позволяет значительно повысить выход готовой продукции по ценностным и объёмным показателям.

В разделе «Проблемы экологии и рационального природопользования» опубликованы результаты исследования продуктивности древостоев и роста деревьев *Abies cilicica* L. в заповеднике «Пихта и кедр», расположенном в северной части прибрежного горного хребта, недалеко от города Слунфа в провинции Латакия, Сирия, с использованием технологии дистанционного зондирования. Точность моделей, оценивающих среднюю высоту, средний диаметр, запас древостоя и площади питания деревьев составила от 6 до 12 %.

В разделе «Даты, события, комментарии» опубликованы рекомендации парламентских слушаний, состоявшихся 14 декабря 2023 года в Комитете Совета Федерации Федерального собрания Российской Федерации по аграрно-продовольственной политике по теме «Лесное семеноводство как основа интенсификации воспроизводства лесов».

Уважаемые читатели, мы надеемся, что результаты исследований, представленные в этом номере, будут вам интересны и полезны в работе.

Профессор Евгений Романов



Dear colleagues!

We are pleased to present the first 2024 issue of our journal.

Sustainable forest management is impossible in any country without up-to-date and reliable forest data. One of the methods of forest resource accounting is the state forest inventory (SFI), the first cycle of which in Russia was completed in 2020. The issue opens with an article written by a team of authors from Volga State University of Technology and Roslesinforg. The article is devoted to the analysis of the growing stock data based on the materials from

57.5 thousand permanent sample plots established in accordance with the SFI methodology in 69 constituent entities of the Russian Federation. The results obtained by the authors may be the basis for revising a large list of regulatory documents governing the objectives and implementation of forestry practices.

The estimation of the phytomass of forest plantations using the Random Forest machine learning algorithm, which was carried out by a team of researchers under the scientific supervision of E. A. Kurbanov, shows that the combination of the Sentinel-2 spectral bands and vegetation indices improves the accuracy of stand phytomass estimates. The work of researchers from the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences under the leadership of V. A. Usoltsev focuses on estimating the phytomass of the bark of branches of Scots pine. The authors have proposed models for estimating the bark share in the branch mass of natural pine forests and plantations.

Two articles deal with biotechnology issues. In the first one, the authors from the Department of Forest Plantations, Selection and Biotechnology (Volga State University of Technology) present the results of developing a method for obtaining primary oak explants from green cuttings. The other article, written by researchers from Kostroma State University, introduces the readers to the features of activating the switch of the development of microspores from the gametophytic to the sporophytic program in varietal forms of blueberry depending on the macroelement composition of the medium.

The section Forestry Technologies and Machines begins with an article that substantiates a novel technology of harvesting timber in commercial fire-damaged pine forests while ensuring the preservation of the seed material for the natural regeneration of pine. The second article presents a method for optimizing the bucking of tree length stems. Simulation modeling of the process of cutting tree lengths into assortments was applied, with input and output factors taken into account. The proposed optimization method allows a significant increase in the yield of finished products in terms of value and volume indicators.

The section Problems of Ecology and Rational Nature Management presents the findings of the study that investigated, using the remote sensing technology, the productivity of forest stands and the growth of *Abies cilicica* L. trees in the Fir and Cedar Reserve located in the northern part of the Syrian coast mountain range near Slunfah in Latakia Governorate, Syria. The accuracy of the models for estimating the average height, average diameter, wood stock and basal area of trees ranged from 6 to 12 %.

The section Dates, Events, Comments provides recommendations of the Parliamentary Hearings held on December 14, 2023 by the Federation Council Committee on Agriculture and Food Policy and Environmental Management on the theme "Forest seed production as a basis for the intensification of forest regeneration".

Dear readers, we hope that you will find the research results presented in this issue interesting and relevant for your work.

Professor Evgeny Romanov

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО FORESTRY

Научная статья

УДК 630*9

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.6>

EDN: INDOJL

Государственная инвентаризация лесов в Российской Федерации: изменчивость и точность определения запаса древесины

**В. Л. Черных^{1✉}, Е. Д. Поваров², С. В. Фёдоров², Л. В. Черных¹,
Д. В. Черных¹, А. С. Фомин¹**

¹Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

²Рослесинфорг,
Российская Федерация, 109316, Москва, Волгоградский пр-т, 45, стр. 1
ChernyhVL@volgatech.net[✉]

Введение. Устойчивое управление лесным сектором в каждой стране невозможно без актуальных и достоверных данных о лесах. В настоящее время одним из методов учёта лесных ресурсов является государственная инвентаризация лесов (ГИЛ) на основе точечных оценок данных постоянных пробных площадей (ППП). Первый цикл ГИЛ в России завершился в 2020 году. Большой объём данных о запасах древесины, полученных выборочным методом, требует глубокого их анализа. **Цель работы** – оценка изменчивости и точности средних значений относительной полноты, запаса древостоев по материалам PPP, выявление причин расхождения относительных полнот и запасов, полученных по данным государственного лесного реестра (ГЛР), и материалами первого цикла ГИЛ 69 субъектов Российской Федерации. **Объекты и методы.** Объектом исследования послужили леса Российской Федерации (РФ). Исследования базируются на материалах ГЛР по состоянию на 01.01.2023 и результатах измерений 57,5 тыс. PPP, заложенных по методике ГИЛ. Анализ выборочных данных проводился с использованием критерия Аббе, правила Томпсона, *t*-распределения, кумуляты, регрессионных моделей. **Результаты.** Выполнены испытания на однородность таксационных показателей PPP ГИЛ, а также проверка гипотезы о равенстве средних значений относительных полнот, вычисленных по материалам ГИЛ и ГЛР по *t*-критерию существенности различия на уровне значимости 0,05. Обоснованы причины расхождения запасов, полученных по данным ГЛР и ГИЛ. **Выводы.** В целом по обобщённым совокупностям средневзвешенных относительных полнот по площади в 69 субъектах РФ изменчивость принимает значение 47,5 % (21,6–103,9 %) по материалам ГИЛ и 27,1 % (2,4–30,9 %) по данным ГЛР. Относительные полноты ГИЛ и ГЛР в 30 регионах существенно не различаются на уровне значимости $\alpha=0,05$, а в остальных 39 субъектах РФ такие различия статистически доказаны. Определена точность оценки относительных полнот по субъектам РФ, которая по материалам PPP ГИЛ находится в пределах от 0,2 до 3,6 %, и по данным ГЛР от 0,1 до 1,0 %. В целом для РФ по данным ГИЛ точность определения запаса древостоев равна 0,25 % и относительной полноты 0,20 %.

Ключевые слова: инвентаризация лесов; постоянные пробные площади; таксация; статистики; выборочная совокупность; запас; кумулята; критерий Аббе; правило Томпсона

© Черных В. Л., Поваров Е. Д., Фёдоров С. В., Черных Л. В., Черных Д. В., Фомин А. С., 2024

Для цитирования: Черных В. Л., Поваров Е. Д., Фёдоров С. В., Черных Л. В., Черных Д. В., Фомин А. С. Государственная инвентаризация лесов в Российской Федерации: изменчивость и точность определения запаса древесины // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 1 (61). С. 6–29. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.6>; EDN: INDOJL

Введение. Успешное, эффективное и устойчивое управление лесным сектором невозможно без актуальных и достоверных данных о лесах. На отсутствие достоверных актуальных сведений об имеющихся лесных ресурсах в нашей стране указывает и «Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года»¹. Известно, что главным источником данных о лесных ресурсах является лесоустройство, банк данных государственного учёта лесного фонда (ГУЛФ), государственный лесной реестр (ГЛР), а с 2007 года государственная инвентаризация лесов (ГИЛ).

Отметим, что в соответствии со статьёй 90 Лесного Кодекса РФ структура ГИЛ² состоит из четырёх разделов:

1) оценка состояния лесов, их количественных и качественных характеристик;

2) анализ качества проведения мероприятий по сохранению лесов;

3) анализ качества проведения и результативности мероприятий по использованию лесов;

4) анализ, оценка и прогноз изменения состояния лесов в целях стратегического планирования в области лесного хозяйства.

В 2022 году Рослесхоз разработал подробный регламент организации и проведения мероприятий по государственной инвентаризации лесов с учётом опыта проведения первого цикла работ по ГИЛ³, который проводился с 2007 по 2020 гг. По данным Рослесхоза, Государственная инвентаризация осуществлена на площади

1 187,6 млн гектаров, заложено 69,1 тыс. пробных площадей⁴.

Определение количественных и качественных характеристик лесов⁵ при первом цикле государственной инвентаризации лесов в РФ проводилось по следующему алгоритму:

– получение и анализ исходных данных на объект работ;

– создание цифровой основы объектов работ на базе топографических карт и материалов лесоустройства;

– подготовка и актуализация базовых карт-схем лесных страт с учётом воздействия антропогенных и природных факторов с использованием данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ);

– изготовление актуализированных карт-схем лесных страт, вычисление площадей страт, уточнение площадей земель лесного фонда;

– камеральное статистическое размещение, определение местоположения пробных площадей;

– полевые работы по закладке пробных площадей и проведение на них исследований и измерений таксационных показателей элементов леса, ярусов и древостоев, оценки биоразнообразия, экологических факторов лесной среды, почвы, компонентов фитомассы, депонирования углерода;

– камеральное определение количественных и качественных характеристик лесов по результатам комплексной обработки данных стратификации и пробных площадей;

– анализ и обобщение результатов, подготовка ежегодных отчётов по субъектам РФ в разрезе лесничеств.

Материалы исходных данных пробных площадей ГИЛ, заложенных на территории субъектов РФ, являются основанием для расчёта и статистической оценки 117 количественных и качественных показателей покрытых лесом земель⁵.

¹ Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573658653> (дата обращения: 21.01.2024).

² Лесной кодекс Российской Федерации (ред. от 13.06.2023). М.: ТК Велби, Издательство «Проспект», 2008. 68 с.

³ Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 6 мая 2022 г. № 556 «Об утверждении Регламента организации и проведения мероприятий по государственной инвентаризации лесов центральным аппаратом Рослесхоза, территориальными органами Рослесхоза и подведомственными Рослесхозу организациями». URL: https://rosleshoz.gov.ru/doc/pr_№556_2022.05.06 (дата обращения: 14.01.2024).

⁴ Итоги первого цикла ГИЛ. URL: <https://roslesinforg.ru/services/gil/#>

⁵ Приказ Рослесхоза от 10 ноября 2011 года № 472 «Об утверждении методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902325555> (дата обращения: 21.01.2024).

Таблица 1. Точность определения запаса при выборочной инвентаризации лесов в разных странах
 Table 1. Accuracy of the growing stock volume estimation during sample forest inventories in different countries

Страна	Дата проведения NFI, год	Точность определения запаса, %		Коэффициент изменчивости запаса на 1 га, %
		расчётная	фактическая	
Швеция [1]	1914	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	–
Швеция [2]	1953...1962	–	$\pm 0,5$	–
Германия [2]	1956...1957	–	$\pm 5,0$	65
Австрия [2]	1961...1970	–	$\pm 13,6$	–
Финляндия [2, 3]	1962, 2011	$\pm 1,0$	$\pm 0,4... \pm 0,5$	–
Россия, Ивановская область [2]	1964	$\pm 5,2$	$\pm 3,8$	–
Россия, Иркутская область [2]	1964	$\pm 2,8$	$\pm 2,7$	–
Болгария [2]	1969	$\pm 5,0$	$\pm 4,9$	70
Литва [2, 4]	1971	$\pm 1,8$	$\pm 0,9$	57,9
США [5]	2016	$\pm 0,5... \pm 1,1$	–	–
Канада [5]	2020	$\pm 2,0... \pm 5,0$	–	–
Россия, первый цикл ГИЛ [6]	2011, 2020	$\pm 1,0 (1,0...5,0)$	$\pm 0,35$	–
Россия, второй цикл ГИЛ: [5] первая зона погрешности; вторая зона погрешности третья зона погрешности	2022	$\pm 5,0$;	–	–
		$\pm 7,0$;	–	–
		$\pm 10,0$	–	–
Евросоюз [7]	2022	–	$-10...+30$	–

Например, средние значения запаса на одном гектаре оцениваются по:

- категориям лесных земель, группам древесных пород и преобладающим породам;
- группам возраста, группам возраста и преобладающим породам, группам возраста и группам древесных пород;
- классам возраста, классам возраста и преобладающим породам, классам возраста и группам древесных пород;
- распределению общего запаса по дифференцированным ступеням толщины.

Такой объём больших и разносторонних данных только о запасах древесины, полученных выборочным методом, требует глубокого их анализа, оценки варьирования и точности средних значений на уровнях агрегирования по лесничествам, субъектам РФ, лесным районам.

Главное преимущество выборочной статистической инвентаризации лесов заключается в том, что характеристики лесов определяются с заранее установленной точностью по запасу древостоев объекта исследований (табл. 1).

Важность определения запаса древесины на всех уровнях управления лесными ресурсами подтверждает и Thomas Gschwantner (2022) при описании целей и задач объединённой Европейской национальной лесной инвентаризации (ENFI) [7].

Впервые математико-статистический подход по инвентаризации лесов Швеции предложил и апробировал в 1840 году A. I. af Strom [цит по: 1]. За основу был принят линейно-выборочный метод [2]. В Финляндии математико-статистический подход был опробован в 1885 году, а в Норвегии в период с 1907 по 1909 год. Анализ методов статистической инвентаризации лесов в зарубежных странах подробно описан в публикациях [2, 3]. В соответствии со Стратегией лесного хозяйства Евросоюза точность определения запаса древостоев считается главным показателем оценки лесных ресурсов, который определяется при проведении ENFI для принятия политических решений при планировании управления лесами [8–11].

В настоящее время национальная инвентаризация лесов математико-статис-

тическим методом проводится в 112 странах мира [3].

Цель работы – оценка изменчивости и точности определения средних значений относительной полноты, запаса древостоев по материалам пробных площадей, выявление причин расхождения относительных полнот и запасов, полученных по данным ГЛР и материалам первого цикла ГИЛ 69 субъектов РФ.

Задачи исследований: 1) выполнить анализ данных измерений и расчётов по материалам постоянных пробных площадей на наличие в выборочных совокупностях систематических погрешностей и резко выделяющихся значений (выбросов) таксационных показателей; 2) определить изменчивость и точность оценки средних значений таксационных показателей; 3) выявить существенность различий средних значений относительных полнот древостоев, полученных по данным ГЛР и материалам первого цикла ГИЛ 69 субъектов РФ.

Объект исследований. Объектом исследования являются покрытые лесом земли 69 субъектов РФ.

Экспериментальными данными служили следующие материалы:

- массив данных таксационных характеристик 97 пробных площадей, заложенных по методике ГИЛ на территории Республики Марий Эл;

- база данных ГЛР «Распределение площади лесов и запасов древесины по преобладающим породам и группам возраста» и «Распределение площади древостоев по группам пород, группам возраста, полнотам и классам бонитета», актуализированная на 01.01.2023;

- базы данных ГИЛ первого цикла работ в формате (программно-измерительного комплекса государственной инвентаризации лесов (далее ПИК ГИЛ) по 69 субъектам РФ в виде агрегированных данных распределения площадей по относительным полнотам и средним значениям запасов древостоев, рассчитанных по материалам 57,5 тыс. шт. постоянных пробных площадей;

- стандартные таблицы сумм площадей сечений и запасов древостоев при полноте 1,0 собранных со всех филиалов ФГБУ «Рослесинфорг».

Методы исследований. Теоретической основой статистической инвентаризации лесов является теория вероятностей, закон больших чисел и тот факт, что таксационные показатели древостоев при выборочном наблюдении являются случайными величинами и их плотность распределения вероятностей подчиняются нормальному закону распределения. Поэтому статистический анализ результатов NFI лесов является основой для получения достоверных, с заданной точностью, оценок расчётных характеристик состояния и динамики лесов объекта исследований, лесного района, субъекта РФ и России в целом.

Первоначально оценка изменчивости относительной полноты и запаса древостоев выполнялась по материалам пробных площадей, заложенных на территории Марий Эл по методике ГИЛ в 2015–2016 гг. Величина пробной площади составляла 0,05 га. Камеральная обработка результатов измерений на пробных площадях выполнялась в соответствии с ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустroительные» по программе Proba2 «Таксация и товарищеская пробных площадей»⁶. Таксационные показатели по элементам леса вычислялись по общепринятым в лесной таксации формулам^{7,8}. Результаты вычислений по каждой пробной площади включены в базу данных таксационных показателей по элементам леса и ярусам. Общее число пробных площадей для статистического анализа составило 97 шт., в том числе: сосна – 56, берёза – 7, липа и ель по 8.

⁶ Информационные технологии в лесоустройстве: учебное пособие / В. Л. Черных, В. К. Хлюстов, М. М. Устинов. М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, 2013. 184 с.

⁷ Верхунов П. М., Черных В. Л. Таксация леса. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. 306 с.

⁸ Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В. В. Загребев, В. И. Сухих, А. З. Швиденко и др. М.: Колос, 1992. 495 с.

При измерении таксационных показателей древостоев по элементам леса на пробных площадях возникают погрешности, связанные с точностью измерительных приборов и инструментов, условиями измерений, субъективными причинами и т. д. Для выявления и устранения таких погрешностей из результатов измерений существуют несколько подходов и критериев. Нами выбран критерий Аббе⁹, который используется для доказательства присутствия в случайной выборке систематических погрешностей. Расчёт критерия Аббе по таксационным показателям на пробных площадях проведён по методу разностей¹⁰.

Определение запаса древостоя по породам и ярусам проводилось по методу объёмных таблиц (Mot), стандартных таблиц сумм площадей сечений и запасов при полноте 1,0 (Mst) и методу видовых высот (Mhf). Все указанные методы определения запаса элемента леса, яруса древостоя используются на практике, поэтому с целью оценки точности определения запаса были выполнены расчёты по всем трём методам.

Расчёт запаса на пробной площади выполнялся по следующим формулам:

а) метод объёмных таблиц (Mot)

$$M_{yr} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^k n_{ji} \cdot V_{ji}^{rh}, \quad (1)$$

где M_{yr} – запас древостоя яруса на единице площади, м³; j – индекс древесной породы, ед.; i – индекс ступени толщины, ед.; rh – индекс разряда высот древесной породы, ед.; m – количество древесных пород, составляющих ярус, ед.; k – количество ступеней толщины древесной породы, ед.; yr – номер яруса древостоя, ед.; n_{ji} – число стволов в i ступени толщины j древесной породы, шт.; V_{ji}^{rh} – объём ство-

ла i ступени толщины j древесной породы и разряда высот rh , м³.

б) метод стандартных таблиц (Mst)

$$M_{yr} = M_{pp}^{1.0} \cdot \frac{\sum_{j=1}^m G_j}{\sum G_{pp}^{1.0}}, \quad (2)$$

где M_{yr} – запас древостоя яруса на 1 га, м³; j – индекс древесной породы, ед.; pp – индекс преобладающей древесной породы, ед.; $M_{pp}^{1.0}$ – запас из стандартных таблиц сумм площадей сечений и запасов при полноте 1,0 по преобладающей породе и её средней высоте на 1 га, м³; $\sum G_{pp}^{1.0}$ – сумма площадей сечений по преобладающей породе, её высоте из стандартных таблиц сумм площадей сечений и запасов при полноте 1,0 на 1 га, м²; $\sum_{j=1}^m G_j$ – общая сумма площадей сечений по древесным породам, составляющим ярус древостоя на 1 га, м².

в) метод видовых высот (Mhf)

$$M_{yr} = \sum_{j=1}^m G_j \cdot HF_j, \quad (3)$$

где M_{yr} – запас древостоя яруса на 1 га, м³; j – индекс древесной породы, ед.; m – количество древесных пород, составляющих ярус, ед.; $\sum_{j=1}^m G_j$ – общая сумма площадей сечений по древесным породам, составляющим ярус древостоя на 1 га, м²; H_j – видовая высота j древесных пород, м; HF_j – видовая высота j древесной породы, составляющей ярус, рассчитанная по уравнению $HF_j = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot H_j$, м.

Расчёт основных статистических показателей интервальных рядов относительных полнот древостоев проводился по методу начальных и центральных моментов¹⁰.

Проверка интервальных рядов распределения относительных полнот и таксационных показателей пробных площадей на наличие выбросов выполнялась по правилу Томпсона [цит по: 12].

При сравнении средних значений относительных полнот, полученных по материалам ГИЛ и ГЛР, использовался «двухвыборочный t -критерий» [12].

⁹ Сергеев А. Г., Крохин В. В. Метрология: уч. пособие. М.: Логос, 2001. 375 с

¹⁰ Соколов П. А., Черных В. Л. Вариационная статистика: уч. пособие. Йошкар-Ола: МарПИ, 1990. 99 с.

Результаты исследований и обсуждение. На первом этапе исследований был выполнен анализ материалов пробных площадей, заложенных по методике ГИЛ на территории Республики Марий Эл.

Вычисленные значения критерия Аббе и его табличные значения на уровне значимости $\alpha=0,01$ и $\alpha=0,05$ по породам приведены в табл. 2. Фактические значения критерия Аббе по всем таксационным показателям и породам больше табличных значений на принятых уровнях значимости. Следовательно, значения таксационных показателей на пробных площадях систематических погрешностей не имеют.

Для выборочной совокупности правильное определение таксационных характеристик древостоя можно проконтролировать, оценить и исправить ошибки.

Доверительные границы оценок выборочной совокупности зависят от многих факторов, которые можно разделить на объективные и субъективные. Устранение субъективных факторов возможно при проверке таксационной характеристики в выборочной совокупности на выбросы по правилу Томпсона [цит по: 12] по следующему алгоритму:

1) формируется выборочная совокупность (x_i ; $i=1; 2; 3; \dots n$) таксационной характеристики элемента леса в пределах

типа леса, лесорастительных условий, происхождения и класса возраста или на уровне агрегирования данных;

2) случайная величина x_i исследуется на однородность. Для каждого значения x_i рассчитывается t -критерий

$$t_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_x}, \quad (4)$$

где $\bar{x}$ – среднее значение; S_x – средне-квадратическое отклонение анализируемой выборочной совокупности;

3) из выборки исключаются все значения x_i , если $|t_i| > t_{m; 1-\frac{\alpha}{2}}$, при $m = n-2$ и уровне значимости $\alpha = 0,01$ или $\alpha = 0,05$.

Критическое значение $t_{m; 1-\frac{\alpha}{2}}$ вычисляется по формулам:

$$t_{m; 0,995} \sim 1,26142 \cdot m^{0,548875} \cdot \arctg\left(\frac{2,04364}{m^{0,548875}}\right), \quad (5)$$

$$t_{m; 0,975} \sim 1,52536 \cdot m^{0,666443} \cdot \arctg\left(\frac{1,28394}{m^{0,666443}}\right); \quad (6)$$

4) после исключения из выборки резко выделяющихся значений случайной величины на принятом уровне значимости формируется новая выборочная совокупность, которая подвергается дальнейшему статистическому анализу.

Таблица 2. Оценка систематических погрешностей результатов измерений на пробных площадях, заложенных по методике ГИЛ на территории Республики Марий Эл

Table 2. Estimation of systematic errors in the results of measurements on sample plots laid out according to SFI methodology on the territory of the Republic of Mari El

Преобладающая порода	Расчётное значение критерия Аббе по таксационным показателям, ед.						n, шт.	Критерий Аббе на уровне значимости	
	полнота, 0,01 ед.	$\sum G$, м ²	запас (м ³), вычисленный по методу			А, лет		0,05	0,01
			Mot*	Mst*	Mhf*				
Берёза	0,998	1,247	1,295	1,292	1,295	1,46	7	0,491	0,307
Липа	1,033	0,899	0,830	0,802	0,786	0,65	8	0,468	0,331
Сосна	0,878	0,851	0,857	0,862	0,864	1,00	56	0,776	0,687
Ель	0,733	0,657	0,879	0,700	0,703	0,62	8	0,491	0,331
Всего	0,888	0,998	1,034	1,010	1,109	1,09	97	0,779	0,712

* Обозначения приведены в тексте на с. 10.

Для проверки вышеприведённого алгоритма по удалению выбросов из выборочной совокупности был выполнен вычислительный эксперимент на материалах массовой таксации. Массив данных составил 17 363 таксационных выдела, характеризующих сосняки брусничные Республики Марий Эл. Рассчитаны доверительные границы для включения контроля на резко выделяющиеся наблюдения по правилу Томпсона. Выявлено, что 818 выделов были исключены из совокупности с доверительной вероятностью 0,95. Ошибки были обнаружены по средним высотам в 165 случаях, по диаметру в 271, по запасу в 382 таксационных выделах. Это показывает, что предложенный методический подход даёт

возможность достоверно оценить таксационные показатели выдела на принятом уровне значимости случайной величины с учётом региональных лесорастительных условий.

Нами выполнена проверка однородности таксационных параметров древостоев в выборочной совокупности, представленной 97 пробными площадями, заложенными по методике ГИЛ на территории Республики Марий Эл. Была выдвинута нулевая гипотеза H_0 : «таксационные показатели древостоев выборочной совокупности пробных площадей однородны».

Проверка на однородность таксационных показателей проводилась на уровне значимости 0,01 и 0,05 (табл. 3).

Таблица 3. Результаты проверки статической гипотезы по правилу Томпсона о резко выделяющихся значениях таксационных показателей в выборочной совокупности пробных площадей, заложенных по методике ГИЛ на территории Республики Марий Эл

Table 3. Results of statistic hypothesis testing by using the Thompson's rule for outlier values of taxation indices in the population of sample plots laid out in line with the SFI methodology on the territory of the Republic of Mari El

Показатель	Ед. измерения	Исходная выборка		Уровень значимости			
				0,01		0,05	
		Хср	п	Хср	п	Хср	п
Характеристика древостоя яруса							
Относительная полнота	0,01 ед.	0,40	97	0,39	96	0,38	95
Сумма площадей сечений	м ²	16,78	97	16,30	96	15,09	93
Запас на 1 га (Mot)*	м ³	171,2	97	171,2	97	152,5	93
Запас на 1 га (Mst)*	м ³	175,8	97	175,8	97	156,4	93
Запас на 1 га (Mhf)*	м ³	178,1	97	178,1	97	158,3	93
Высота	м	20,3	97	20,3	97	20,3	97
Индекс класса бонитета	0,1 ед.	30,4	97	30,4	97	30,4	97
Запас при полноте 1,0	м ³	394,3	97	394,3	97	394,3	97
Характеристика преобладающего элемента леса							
Полнота	0,01 ед.	0,29	97	0,27	95	0,26	93
Сумма площадей сечений	м ²	12,77	97	11,89	95	10,74	92
Запас на 1 га (Mot)*	м ³	129,5	97	115,3	94	106,7	92
Запас на 1 га (Mst)*	м ³	133,0	97	113,6	93	109,6	92
Запас на 1 га (Mhf)*	м ³	134,8	97	119,7	94	111,0	92
Высота	м	19,7	97	19,7	97	19,7	97
Коэффициент состава	%	79,0	97	79,0	97	79,0	97
Видовая высота	м	9,08	97	9,08	97	9,08	97
Видовое число	0,001 ед.	0,478	97	0,454	94	0,447	93
Возраст	лет	56,6	97	56,6	97	54,3	95
Выход деловой древесины	%	68,2	97	68,2	97	68,2	97

* Mot – метод объёмных таблиц; Mst – метод стандартных таблиц; Mhf – метод видовых высот (см. с. 10).

При оценке древостоя яруса по средней высоте, классу бонитета и запасу при полноте 1,0 резко выделяющихся значений не обнаружено, принимается нулевая гипотеза. А такие таксационные характеристики, как абсолютная полнота, запас, рассчитанный по методу объёмных таблиц, стандартных таблиц сумм площадей сечений и запасов при полноте 1,0 и методу видовых высот на уровне значимости 0,05, имеют резко выделяющиеся значения на пяти пробных площадях. Отметим, что на уровне значимости 0,01 по запасу отклонений нет. Загрязнёнными выборками оказались совокупности по относительной и абсолютной полноте яруса. В выборочных совокупностях с доверительной вероятностью 0,95 и 0,99 имеются выбросы. При их исключении величина средних значений таксационных показателей меняется (см. табл. 3).

Проверка однородности таксационных показателей по преобладающему элементу леса на 97 пробных площадях показала, что резко выделяющихся значений высоты, коэффициента состава, видо-

вой высоты и выхода деловой древесины в выборках нет; выборки однородны. По другим таксационным показателям выборки имеют грубые погрешности, которые в большей степени выявляются на уровне значимости $\alpha = 0,05$ ед.

Вышесказанное доказывает необходимость проверки анализируемых выборочных совокупностей на наличие или отсутствие в них резко выделяющихся наблюдений (измерений). После проверки на однородность первичной выборочной совокупности и исключения резко выделяющихся значений случайной величины на принятом уровне значимости формируется новая выборочная совокупность, принадлежащая одной генеральной совокупности для дальнейшего статистического анализа.

Рассмотрим статистические показатели в виде средних значений ($\bar{X}$), их оценки точности (P_x) и коэффициентов изменчивости (V), рассчитанные по элементам леса, ярусам и в целом по преобладающим древесным породам (табл. 4).

Таблица 4. Изменчивость и точность оценки средних значений таксационных показателей по материалам пробных площадей, заложенных по методике ГИЛ на территории Республики Марий Эл
Table 4. Variability and accuracy of the estimation of the average values of taxation indices on the basis of materials from the sample plots laid out according to the SFI methodology on the territory of the Republic of Mari El

Таксационные показатели	Преобладающая порода	Статистические показатели		
		$\bar{X}_{ср}$	$V, \%$	$P_x, \%$
Относительная полнота, 0,01 ед.	Берёза	0,52	63,4	23,98
Сумма площадей сечений ($\sum G$), м ²		16,5	67,7	25,59
Запас по методу объёмных таблиц (Mot), м ³		163,5	73,4	27,75
Запас по методу стандартных таблиц (Mst), м ³		168,7	73,9	27,93
Запас по методу видовых высот (Mhf), м ³		171,3	74,0	27,97
A, лет		45,7	41,5	15,67
Объём выборки, шт.		7		
Относительная полнота, 0,01 ед.	Липа	0,68	38,2	13,49
Сумма площадей сечений ($\sum G$), м ²		27,5	39,9	14,11
Запас по методу объёмных таблиц (Mot), м ³		275,5	38,6	13,63
Запас по методу стандартных таблиц (Mst), м ³		285,0	43,2	15,28
Запас по методу видовых высот (Mhf), м ³		291,4	43,2	15,29
A, лет		59,6	48,4	17,1
Объём выборки, шт.		8		
Относительная полнота, 0,01 ед.	Сосна	0,32	62,1	8,3
Сумма площадей сечений ($\sum G$), м ²		15,4	69,5	9,28
Запас по методу объёмных таблиц (Mot), м ³		156,2	82,0	10,95
Запас по методу стандартных таблиц (Mst), м ³		159,4	82,2	10,99
Запас по методу видовых высот (Mhf), м ³		161,6	82,3	11,0
A, лет		58,3	38,1	5,09
Объём выборки, шт.		52		

Окончание таблицы 4

Таксационные показатели	Преобладающая порода	Статистические показатели		
		Хср	V, %	Pх, %
Относительная полнота, 0,01 ед.	Ель	0,55	35,9	12,69
Сумма площадей сечений (ΣG), м ²		21,5	31,2	11,01
Запас по методу объёмных таблиц (Mot), м ³		224,0	30,3	10,71
Запас по методу стандартных таблиц (Mst), м ³		234,8	35,2	12,45
Запас по методу видовых высот (Mhf), м ³		237,0	34,9	12,34
A, лет		63,9	32,2	11,4
Объём выборки, шт.		8		
Относительная полнота, 0,01 ед.	Всего	0,40	64,0	6,49
Сумма площадей сечений (ΣG), м ²		16,8	65,5	6,65
Запас по методу объёмных таблиц (Mot), м ³		171,2	74,0	7,52
Запас по методу стандартных таблиц (Mst), м ³		175,8	74,6	7,58
Запас по методу видовых высот (Mhf), м ³		178,1	74,8	7,59
A, лет		56,6	40,5	4,11
Объём выборки, шт		97		

Наибольшая величина коэффициента изменчивости запаса, вычисленная по методу объёмных таблиц, оказалась в сосняках – 82,0, минимальная в ельниках – 30,3, а для всей совокупности – 74,0 %.

Самая высокая точность оценки средних значений относительной полноты, суммы площадей сечений, запаса и возраста была получена по общей совокупности пробных площадей (табл. 4). Следовательно, для сравнительной оценки таксационных показателей древостоев на различных территориальных уровнях можно использовать обобщающие выборочные совокупности и их статистики, в том числе и показатели полноты и запаса древостоев с заданной точностью.

Для подтверждения правильности такого вывода о статистических показателях были сгенерированы случайные выборки по анализируемым таксационным показателям для берёзы, ели и липы. Объём каждой выборки составил 52 ед. В результате статистической обработки модельных случайных выборок установлено, что коэффициент изменчивости запаса берёзы снизился на 9,0 %, ели на 0,5 %, а липы увеличился на 11,7 %. Коэффициент изменчивости запаса по обобщающей выборке объёмом 208 ед. в сравнении с выборкой по таксационным показателям пробных площадей с числом наблюдений

97 ед. снизился на 7,5 %. Таким образом, увеличение числа наблюдений до 52 ед. повышает точность оценки средних значений запаса древостоев на 2,9–3,1 %. Полученные результаты по модельным и натурным выборочным совокупностям об изменчивости и точности оценки таксационных показателей древостоев, произрастающих на территории Марий Эл, доказывают, что для обобщённой оценки продуктивности древостоев можно использовать показатели относительной полноты и запаса на различных уровнях агрегирования данных о лесных ресурсах.

При оценке точности методов таксации запаса древостоев за истинный запас был принят метод таксации по объёмным таблицам. Вычислены систематические и случайные погрешности определения запаса древостоя. Оказалось, что метод стандартных таблиц в среднем имеет систематическую погрешность, равную -1,2 %, а случайная погрешность составляет 14,4 %. Для метода таксации запаса по видовой высоте такие погрешности составляют -2,4 и 14,6 % соответственно.

Анализ материалов первого цикла ГИЛ на примере 69 субъектов РФ показывает, что при оценке запасов древесины по регионам страны имеется систематическое превышение относительной полноты и запасов, рассчитанных по данным

постоянных пробных площадей ГИЛ над данными ГЛР. По нашему мнению, причинами такого различия в оценке продуктивности древостоев в ходе лесоустроительных работ могут быть: а) нормативное ограничение не более 1,0 величины относительной полноты древостоев при таксации лесов¹¹; б) систематическое занижение полноты при таксации лесов, связанное с её нормативным ограничением.

Для того, чтобы исследовать влияние на оценку запасов древесины нормативного ограничения на величину относительной полноты не более единицы, следует учесть, что принята формулировка нормального леса как максимально загущенного древостоя: «Нормальный лес – теоретическая модель совершенного леса, имеющего относительную полноту равную 1,0, наивысший средний прирост древесины, равномерную возрастную структуру и максимальный запас древесины»¹².

Это понимание приводит к тому, что при таксации леса инженер-таксатор, инструментально определив на таксационном выделе сумму площадей сечения стволов, превышающую максимальное значение региональных стандартных таблиц сумм площадей сечений и запасов, вынужден её ограничивать единицей, исходя из регламентирующих критериев нормативных документов и, в первую очередь, Лесоустроительной инструкции, что при таксации высокопродуктивных древостоев приводит к занижению запаса древесины.

Для определения доли древостоев с полнотой более 1,0 по данным заложенных ППП в первом цикле работ ГИЛ были использованы базы данных ПИК ГИЛ по 69 субъектам РФ и «Сборник стандартных таблиц сумм площадей

сечений и запасов насаждений при полноте 1,0»¹³ (далее – стандартные таблицы).

В исследование не были включены города федерального значения и южные субъекты РФ, леса которых представлены преимущественно полесами и колочными лесами среди степей. Не включены новые субъекты РФ.

Из расчёта исключались ППП, заложенные в древостоях первого класса возраста в силу того, что относительная полнота в них определяется не через сумму площадей сечений, а через густоту. Кроме того, был сделан дисперсионный анализ полнот древостоев на ППП, в ходе которого получено среднее значение полноты в лесах РФ, которое составило $0,62 \pm 0,035$, стандартное отклонение – 0,35 ед. Таким образом, с вероятностью 0,68 относительные полноты лежат в пределах от 0,27 до 0,98 ед., а с вероятностью 0,95 – в пределах от 0,0 до 1,33 ед. Окончательно принято решение включить в исследование ППП, полнота древостоев которых лежит в пределах от 0,1 до 2,0 ед.

По каждой ППП был определён запас на 1 га и относительная полнота с использованием стандартных таблиц, а через распределённую по ППП площадь лесов субъекта РФ вычислено долевое участие древостоев по относительным полнотам по данным ГИЛ.

Отметим, что значимым показателем результатов ГИЛ первого цикла работ является величина представленности древостоев с полнотой более 1,0 (рис. 1).

Расчёты показали, что представленность древостоев с полнотой, превышающей единицу, по большинству субъектов РФ, включённых в исследование, колеблется от 10 до 15 %, при максимуме 36,5 % (Московская область) и минимуме 4,7 % (Республика Алтай); средневзвешенная от площади лесов субъектов РФ – 11,8 %.

¹¹ Приказ Минприроды России от 05.08.2022 № 510 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции» (п. 262). URL: <https://docs.cntd.ru/document/351878696> (дата обращения: 10.01.2024).

¹² Энциклопедия лесного хозяйства: в 2-х томах. М.: ВНИИЛМ, 2006. Т. 2, с. 59.

¹³ Сборник стандартных таблиц сумм площадей сечений и запасов насаждений при полноте 1.0 / Е. Д. Поваров и др.; под. ред. Б. В. Рощина. М.: Рослесинфорг, 2021. 183 с.

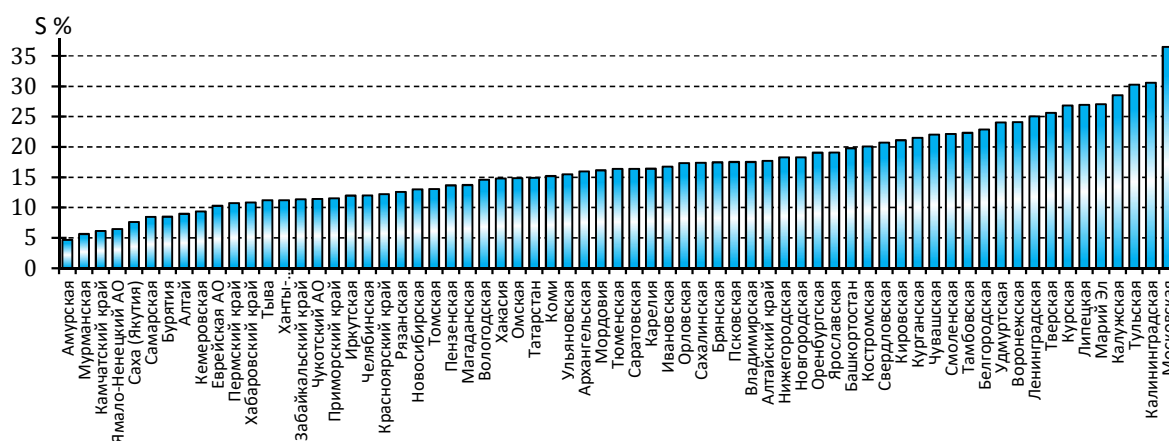


Рис. 1. Доля площади древостоев с полнотой более 1,0 в субъектах РФ
Fig. 1. Share of land area covered by forest stands of normality higher than 1.0 in constituent entities of the Russian Federation

Для статистического анализа относительных полнот по данным ГЛР и ГИЛ были построены ряды распределения площадей древостоев по относительным полнотам для каждого субъекта РФ. Статистические показатели относительных полнот рассчитывались по методу моментов (табл. 5). Объём выборки для каждого субъекта составлял 100 ед.

Оценка точности и изменчивости средней полноты по субъектам РФ по

данным ГИЛ и ГЛР приведена в табл. 5. Материалы пробных площадей ГИЛ показывают, что по РФ относительная полнота древостоев имеет высокую изменчивость равную 57,0 %. По обобщённым совокупностям средневзвешенных относительных полнот по площади в 69 субъектах РФ изменчивость принимает значение 47,5 % (21,6–103,9 %) по материалам ГИЛ и 27,1 % (2,4–30,9 %) по данным ГЛР (рис. 2).



Рис. 2. Оценка изменчивости относительной полноты древостоев в субъектах РФ по материалам ГИЛ

Fig. 2. Estimation of variability in the relative completeness of stands in constituent entities of the Russian Federation (based on SFI materials)

Таблица 5. Статистические показатели относительных полнот, вычисленных по материалам ГИЛ, ГЛР и субъектам РФ (фрагмент)

Table 5. Statistical indicators of the relative completeness of stands calculated on the basis of SFI and SFR materials with respect to constituent entities of the Russian Federation (fragment)

Регион	Статистические показатели относительной полноты								
	x_{cp}	σ	m_x	m_σ	V	m_V	P_x	m_p	n
ГИЛ									
Российская Федерация	0,62	0,355	0,035	0,025	57,0	5,2	5,7	0,52	100
Республика Алтай	0,58	0,342	0,034	0,024	58,9	5,4	5,9	0,54	100
Алтайский край	0,71	0,35	0,035	0,025	49,2	4,2	4,9	0,42	100
Амурская область	0,47	0,292	0,029	0,021	62,6	5,9	6,3	0,59	100
Архангельская область	0,74	0,339	0,034	0,024	46,1	3,9	4,6	0,39	100
Республика Башкортостан	0,78	0,321	0,032	0,023	40,9	3,3	4,1	0,33	100
Белгородская область	0,88	0,248	0,025	0,018	28,2	2,1	2,8	0,21	100
Брянская область	0,78	0,3	0,03	0,021	38,5	3,1	3,8	0,31	100
Республика Бурятия	0,56	0,325	0,032	0,023	58,1	5,3	5,8	0,53	100
Владимирская область	0,79	0,308	0,031	0,022	38,7	3,1	3,9	0,31	100
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Ямало-Ненецкий автономный округ	0,44	0,326	0,033	0,023	74,5	7,7	7,4	0,77	100
Ярославская область	0,75	0,277	0,028	0,02	36,8	2,9	3,7	0,29	100
ГЛР									
Российская Федерация	0,58	0,164	0,016	0,012	28,3	2,2	2,8	0,22	100
Республика Алтай	0,54	0,134	0,013	0,009	25	1,9	2,5	0,19	100
Алтайский край	0,59	0,157	0,016	0,011	26,5	2	2,6	0,2	100
Амурская область	0,5	0,145	0,014	0,01	28,7	2,2	2,9	0,22	100
Архангельская область	0,64	0,152	0,015	0,011	23,8	1,8	2,4	0,18	100
Республика Башкортостан	0,66	0,148	0,015	0,01	22,5	1,7	2,2	0,17	100
Белгородская область	0,7	0,098	0,01	0,007	14	1	1,4	0,1	100
Брянская область	0,69	0,119	0,012	0,008	17,3	1,3	1,7	0,13	100
Республика Бурятия	0,58	0,15	0,015	0,011	25,9	2	2,6	0,2	100
Владимирская область	0,71	0,116	0,012	0,008	16,4	1,2	1,6	0,12	100
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Ямало-Ненецкий автономный округ	0,46	0,118	0,012	0,008	25,7	1,9	2,6	0,19	100
Ярославская область	0,61	0,144	0,014	0,01	23,5	1,8	2,4	0,18	100

К факторам, влияющим на коэффициент изменчивости запаса древостоев по субъектам РФ, нужно отнести, в первую очередь, почвенно-климатические условия, продуктивность и производительность лесов, структуру, разнообразие и ход роста по таксационным показателям лесобразующих древесных пород, а при статистическом анализе количество рядов распределения в совокупности случайной выборки.

Результаты других исследователей подтверждают высокую изменчивость

относительных полнот и запасов древостоев. Например, В. В. Антанатис и И. В. Репшис в работе по обобщению опыта инвентаризации лесов Литвы математико-статистическим методом показали, что изменчивость запаса в среднем равна 57,9 % [4].

И. И. Красиков установил, что распределение таксационных выделов лиственницы в Республике Тыва по относительной полноте подчиняется нормальному закону распределения. Средняя полнота приспевающих и старше древостоев равна 0,6 при

коэффициенте изменчивости 20,8–23,6 %. Максимальная относительная полнота с вероятностью 0,99 не выходит за пределы 0,88 [13].

Для березняков Красноярско-Ачинско-Канского лесостепного района изменчивость запаса в молодняках составляет 74,5 %, а в спелых и перестойных древостоях 23,0 %. Изменчивость относительной полноты не зависит от возраста и принимает значения 18,5–21,3 % [14].

Анализ материалов ГИЛ Кодаинского лесничества Красноярского края на площади 77,2 тыс. га показал, что общий запас древостоев по материалам ГИЛ выше на 26,9 %, чем по материалам лесоустройства, в том числе по хвойному хозяйству изменение составило 27,5 %, а в мягколиственном – 23,6 % [15].

Анализ средних запасов на 1 га позволил установить, что по материалам ГИЛ в целом по лесным субъектам РФ запас выше на 31,3 % в сравнении с данными ГЛР по состоянию на 01.01.2023 года (рис. 3).

Наибольшее различие средних запасов установлено в Свердловской области (50,2 %) и Пермском крае (44,2 %), наименьшее (7,1 %) – в Республике Тыва и 14,3 % в Республике Татарстан. Отме-

чены три случая, когда запасы на 1 га по ГИЛ меньше или равны по материалам ГЛР. Так, в Ямало-Ненецком АО запас на 1 га меньше на 5,1 %, Республике Алтай на 2,2 %, а в Мурманской области отклонений нет.

Такое различие по относительной полноте и запасу, определённом при глазомерной таксации лесов, подтверждается и многими публикациями, ряд авторов показывают, что запас по материалам ГЛР ниже на 15–40 %, чем фактический [4–6, 16–18].

Анализ результатов вычислительного эксперимента при инвентаризации лесов Учебно-опытного лесничества ПГТУ показал, что изменчивость таксационных показателей в стратах снижается с увеличением возраста и принимает характеристики от очень большой (50–80 %) в молодняках до умеренной в спелых древостоях (11 %) [19].

Проверка гипотезы о равенстве средних значений относительных полнот, вычисленных по материалам ГИЛ, ГЛР и субъектам РФ (табл. 6), выполнялась с использованием *t*-критерия существенности различия с доверительной вероятностью 0,99 и 0,95 [12].

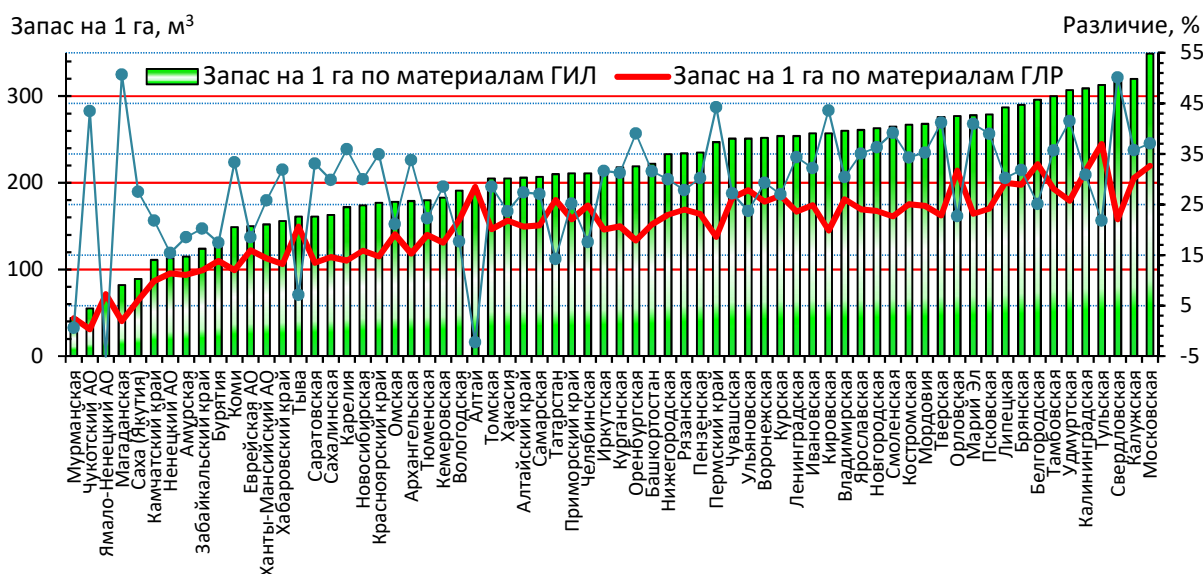


Рис 3. Сравнение средних запасов на 1 га по данным ГИЛ и ГЛР
Fig 3. Comparison of the average growing stock per hectare according to SFI and SFR data

Таблица 6. Проверка гипотезы о равенстве средних значений относительных полнот, вычисленных по материалам ГИЛ, ГЛР и субъектам РФ

Table 6. Testing of the hypothesis on the equality of relative completeness averages calculated on the basis of SFI and SFR materials with respect to constituent entities of the Russian Federation

Субъект РФ	Относительная полнота		Вычисленные значения t -критерия существенности различия относительных полнот по субъектам РФ			
			$t_{198;0,975}=1,97$		$t_{198;0,995}=2,60$	
	ГИЛ	ГЛР	$p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	$p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$	$p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	$p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$
Российская Федерация	0,62	0,58	0,93	–	0,93	–
Республика Алтай	0,58	0,54	0,91	–	0,91	–
Алтайский край	0,71	0,59	–	2,68	–	2,68
Амурская область	0,47	0,50	-0,72	–	-0,72	–
Архангельская область	0,74	0,64	–	2,36	–	2,36
Республика Башкортостан	0,78	0,66	–	3,31	–	3,31
Белгородская область	0,88	0,70	–	6,06	–	6,06
Брянская область	0,78	0,69	–	2,61	–	2,61
Республика Бурятия	0,56	0,58	-0,39	–	-0,39	–
Владимирская область	0,79	0,71	–	2,5	–	2,5
Вологодская область	0,73	0,67	1,41	–	1,41	–
Воронежская область	0,80	0,68	–	2,84	–	2,84
Еврейская автономная область	0,61	0,52	1,79	–	1,79	–
Забайкальский край	0,56	0,54	0,44	–	0,44	–
Ивановская область	0,77	0,65	–	3,39	–	3,39
Иркутская область	0,67	0,62	1,13	–	1,13	–
Калининградская область	0,88	0,70	–	4,6	–	4,6
Республика Калмыкия	1,04	0,66	–	9,94	–	9,94
Калужская область	0,88	0,71	–	4,41	–	4,41
Камчатский край	0,51	0,55	-0,66	–	-0,66	–
Республика Карелия	0,73	0,64	–	2,15	–	2,15
Кемеровская область	0,61	0,56	0,98	–	0,98	–
Кировская область	0,79	0,73	1,46	–	1,46	–
Республика Коми	0,69	0,59	–	2,19	–	2,19
Костромская область	0,79	0,70	–	2,56	–	2,56
Красноярский край	0,60	0,59	0,36	–	0,36	–
Курганская область	0,79	0,69	–	2,85	–	2,85
Курская область	0,86	0,68	–	4,84	–	4,84
Ленинградская область	0,84	0,67	–	3,79	–	3,79
Липецкая область	0,88	0,69	–	4,99	–	4,99
Магаданская область	0,55	0,41	–	2,22	–	2,22
Республика Марий Эл	0,86	0,65	–	5,36	–	5,36
Республика Мордовия	0,79	0,69	–	2,87	–	2,87
Московская область	0,92	0,66	–	6,28	–	6,28
Мурманская область	0,43	0,46	-0,54	–	-0,54	–
Ненецкий автономный округ	0,63	0,61	0,43	–	0,43	–
Нижегородская область	0,76	0,70	1,56	–	1,56	–
Новгородская область	0,78	0,66	–	3,35	–	3,35
Новосибирская область	0,67	0,59	1,79	–	1,79	–
Омская область	0,71	0,66	1,23	–	1,23	–
Оренбургская область	0,74	0,65	–	2,25	–	2,25
Орловская область	0,77	0,67	–	2,86	–	2,86
Пензенская область	0,76	0,70	1,81	–	1,81	–
Пермский край	0,70	0,66	1,28	–	1,28	–
Приморский край	0,69	0,59	–	2,54	–	2,54
Псковская область	0,77	0,66	–	2,94	–	2,94
Рязанская область	0,69	0,67	0,4	–	0,4	–

Окончание таблицы 6

Субъект РФ	Относительная полнота		Вычисленные значения t -критерия существенности различия относительных полнот по субъектам РФ			
			$t_{198;0,975}=1,97$		$t_{198;0,995}=2,60$	
	ГИЛ	ГЛР	$p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	$p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$	$p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	$p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$
Самарская область	0,68	0,63	1,43	–	1,43	–
Саратовская область	0,71	0,66	1,32	–	1,32	–
Республика Саха (Якутия)	0,52	0,53	-0,14	–	-0,14	–
Сахалинская область	0,68	0,54	–	2,94	–	2,94
Свердловская область	0,81	0,69	–	3,24	–	3,24
Смоленская область	0,79	0,69	–	2,61	–	2,61
Тамбовская область	0,85	0,72	–	3,87	–	3,87
Республика Татарстан	0,73	0,66	1,69	–	1,69	–
Тверская область	0,84	0,70	–	3,82	–	3,82
Томская область	0,73	0,60	–	3,13	–	3,13
Тульская область	0,91	0,70	–	5,67	–	5,67
Республика Тыва	0,59	0,53	1,22	–	1,22	–
Тюменская область	0,72	0,60	–	2,75	–	2,75
Республика Удмуртия	0,81	0,70	–	2,9	–	2,9
Ульяновская область	0,75	0,69	1,69	–	1,69	–
Хабаровский край	0,60	0,54	1,15	–	1,15	–
Республика Хакасия	0,70	0,58	–	2,66	v	2,66
Ханты-Мансийский АО	0,62	0,56	1,29	–	1,29	–
Челябинская область	0,68	0,65	0,81	–	0,81	–
Республика Чувашия	0,76	0,67	–	2,5	2,5	–
Чукотский АО	0,43	0,41	0,32	–	0,32	–
Ямало-Ненецкий АО	0,44	0,46	-0,36	–	-0,36	–
Ярославская область	0,75	0,61	–	3,92	–	3,92

Расчёт t -критерия проводился по формуле:

$$t_{st} = \frac{p_{\text{гил}} - p_{\text{глр}}}{\sqrt{\frac{(n_1-1) \cdot s_1^2 + (n_2-1) \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}, \quad (7)$$

где $p_{\text{гил}}$ и $p_{\text{глр}}$ – относительные полноты, рассчитанные по данным ГИЛ и ГЛР, ед.; n_1 – объём выборки по материалам ГИЛ, шт.; n_2 – объём выборки по материалам ГЛР, шт.; s_1^2 – дисперсия относительной полноты, вычисленная по материалам ГИЛ, шт.; s_2^2 – дисперсия относительной полноты, вычисленная по материалам ГЛР, шт.; t_{st} – критерий существенности различий средних значений, ед.

Выдвинутая гипотеза H_0 : $p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$ о равенстве средних значений относительных полнот по субъектам РФ (табл. 6, 7 и рис. 3) принимается в том случае, когда $(|t_{st}| < t_{n_1+n_2-2; \alpha/2})$ вычисленный критерий

существенности различий средних значений меньше, чем табличное на принятом уровне значимости α с $m = (n_1 + n_2 - 2)$ степенями свободы. Гипотеза H_0 о равенстве средних значений относительных полнот отвергается, если $|t_{st}| > t_{n_1+n_2-2; \alpha/2}$, и принимается альтернативная H_a : $p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$.

Результаты расчётов значений t -критерия существенности различия относительных полнот по данным ГИЛ и ГЛР приведены по субъектам РФ на двух уровнях значимости (см. табл. 7). Выяснилось, что средние относительные полноты в 30 регионах существенно не различаются на уровне значимости $\alpha = 0,05$, нулевая гипотеза принимается, а в остальных 39 субъектах РФ принимается альтернативная H_a : $p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$. При повышении уровня значимости до $\alpha = 0,01$ в 39 регионах относительные полноты существенно не различаются, в том числе по РФ в целом так как $|t_{st}| < 2,60_{198;0,01}$ (табл. 7 и рис. 4).

Таблица 7. Результаты проверки гипотезы о равенстве средних значений относительных полнот по субъектам РФ, вычисленных по материалам ГИЛ и ГЛР

Table 7. Results of testing the hypothesis on the equality of relative completeness averages calculated on the basis of SFI and SFR materials with respect to constituent entities of the Russian Federation

Гипотеза о равенстве средних значений относительных полнот, вычисленных по материалам ГИЛ и ГЛР	Количество объектов, ед.		Уровень значимости α , ед.
	субъектов РФ	РФ	
$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	30	1	0,05
$H_a: p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$	39	—	0,05
Итого	69	1	
$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	39	1	0,01
$H_a: p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$	30	—	0,01
Итого	69	1	



Рис. 4. Существенность различий средних значений относительных полнот древостоев по субъектам РФ, вычисленных по материалам ГИЛ и ГЛР

Fig. 4. Significance of differences in the average values of the relative completeness of stands in constituent entities of the Russian Federation (based on SFI and SFR data)

Вычисленные числовые значения относительной полноты после исключения выбросов из выборочной совокупности по критерию Томпсона и существенности

различия между средними значениями по t -критерию приведены в табл. 8. Отметим, что объём анализируемой выборки для каждого субъекта РФ составлял 100 ед.

Таблица 8. Основные статистики относительной полноты после исключения резко выделяющихся наблюдений из выборочной совокупности по критерию Томпсона и существенности различия между средними значениями, вычисленными по материалам ГИЛ и ГЛР

Table 8. Basic statistics of the relative completeness of stands after removing the outliers of the observation data from the sampling population using the Thompson's criterion, and the significance of the difference between the average values computed on the basis of SFI and SFR materials

Выборочная совокупность	Статистическая гипотеза	Статистические показатели		
		полнота, ед.	точность оценки, %	коэффициент изменчивости, %
Экспериментальные данные				
РФ, ГИЛ	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,622	6,4	63,7
РФ, ГЛР	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,577	4,8	47,8
СФ, ГИЛ	Всего	0,719	5,3	52,6
СФ, ГИЛ	$H_a: p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$	0,791	4,3	43,1
СФ, ГИЛ	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,626	6,5	64,9
СФ, ГЛР	Всего	0,626	3,8	37,7
СФ, ГЛР	$H_a: p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$	0,652	3,2	31,9
СФ, ГЛР	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,592	4,5	45,4
С учётом правила Томпсона на уровне значимости $\alpha=0,05$				
РФ, ГИЛ	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,589	6,5	63,8
РФ, ГЛР	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,577	4,8	47,8
СФ, ГИЛ	Всего	0,701	5,2	50,6
СФ, ГИЛ	$H_a: p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$	0,776	4,0	39,2
СФ, ГИЛ	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,602	6,6	65,4
СФ, ГЛР	Всего	0,628	3,7	37,1
СФ, ГЛР	$H_a: p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$	0,655	3,1	31,2
СФ, ГЛР	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,593	4,5	45,1
С учётом правила Томпсона на уровне значимости $\alpha=0,01$				
РФ, ГИЛ	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,606	6,4	63,2
РФ, ГЛР	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,577	4,8	47,8
СФ, ГИЛ	Всего	0,708	5,2	51,6
СФ, ГИЛ	$H_a: p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$	0,780	4,2	41,5
СФ, ГИЛ	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,613	6,5	64,7
СФ, ГЛР	Всего	0,627	3,8	37,5
СФ, ГЛР	$H_a: p_{\text{гил}} \neq p_{\text{глр}}$	0,653	3,2	31,7
СФ, ГЛР	$H_0: p_{\text{гил}} = p_{\text{глр}}$	0,592	4,5	45,3

Так, для субъектов РФ, где различия в относительных полнотах статистически не доказаны, применение правила Томпсона на уровне значимости 0,05 ед. показывает смещение средних значений относительной полноты на 14,0 % по данным ГИЛ и на 5,6 % по материалам ГЛР. В тех субъектах РФ, где различия в относительных полнотах статистически существенны на уровне значимости 0,05, оценка средних полнот выше на 10,8 % по данным ГИЛ и на 4,2 % по материалам ГЛР. Границы и средние значения погрешностей опреде-

ления относительной полноты с учётом правила Томпсона более выражены на уровне значимости 0,05. При этом различия абсолютных значений относительных полнот, вычисленных по материалам ГИЛ на уровне значимости 0,05, и исходной выборки по РФ составляют 5,3 %.

Для выявления конкретных значений относительной полноты, полученных по материалам ГИЛ и ГЛР, воспользуемся эмпирической функцией распределения вероятностей в виде кумуляты (рис. 5) и представим их математические модели.

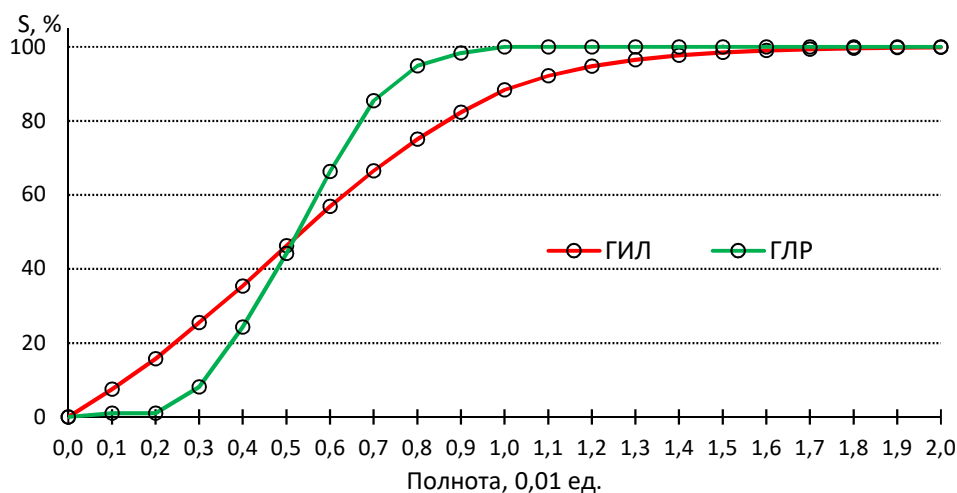


Рис. 5. Кумулята распределения площади покрытых лесом земель по ступеням относительных полнот по материалам ГИЛ и ГЛР для 69 субъектов РФ с доверительной вероятностью 0,95

Fig. 5. Cumulative curve of the distribution of forested land area by relative completeness degree, based on SFI and SFR data, for 69 constituent entities of the Russian Federation (confidence level = 0.95)

Модели кумуляты площадей (%) по классам относительных полнот (p) для 69 субъектов РФ:

1) по материалам ГИЛ

$$n^{\text{ГИЛ}} = 100 \cdot [1 - \exp(-1,726 \cdot p)^{p^{1,2322}}], \quad (8)$$

$$R^2 = 0,999$$

где p – значение относительной полноты, $p = 0,1; 0,2 \dots 2,0$ ед.; $n^{\text{ГИЛ}}$ – сумма накопленных частот, %.

2) по материалам ГЛР

$$n^{\text{ГЛР}} = 100 \cdot [1 - \exp(-5,1887 \cdot p)^{p^{3,0110}}], \quad (9)$$

$$R^2 = 0,998$$

Модели имеют высокий коэффициент детерминации, зависимость между относительной полнотой и суммой накопленных частот очень высокая. Табулированные значения кумуляты по полноте с шагом 0,01, полученные по вышеприведённым моделям, позволили определить числовые значения относительной полноты. Так, при достижении кумуляты 50,0 % значение относительной полноты по материалам ГИЛ равно 0,665, а по материалам ГЛР – 0,606 ед. Отметим, что средневзвешенное значение полноты по обобщённым эмпирическим частотам по материалам ГИЛ составляет 0,622, а по материалам ГЛР – 0,577 ед. Следовательно, эмпирические

различия между значениями относительной полноты, вычисленные по данным ГИЛ и ГЛР в целом по 69 субъектам РФ, составляют 7,2 %.

Всесторонний статистический анализ материалов 57,5 тыс. ППП ГИЛ позволил определить, что точность оценки средних относительных полнот по 69 субъектам РФ принимает значения в пределах от 0,2 до 3,6 %, а оценка средней относительной полноты древостоев по РФ в целом равна 0,2 %. Точность оценки относительной полноты по материалам ГЛР находится в интервале от 0,1 до 1,0 % для субъектов РФ, а по РФ в целом равна $\pm 0,1$ %.

Для определения доли недоучтённого запаса древесины при нормативном ограничении величины относительной полноты методом объёмных таблиц были вычислены запасы древесины на ППП ГИЛ. В тех ППП, в которых относительная полнота превышала 1,0, запасы, по региональным стандартным таблицам, были приведены к полноте 1,0. В разрезе субъектов РФ и в целом по всему массиву вычислены средние запасы на 1 га и определены доли разницы между исходным результатом и приведённым к полноте 1,0. Разница приведена на рис. 6.

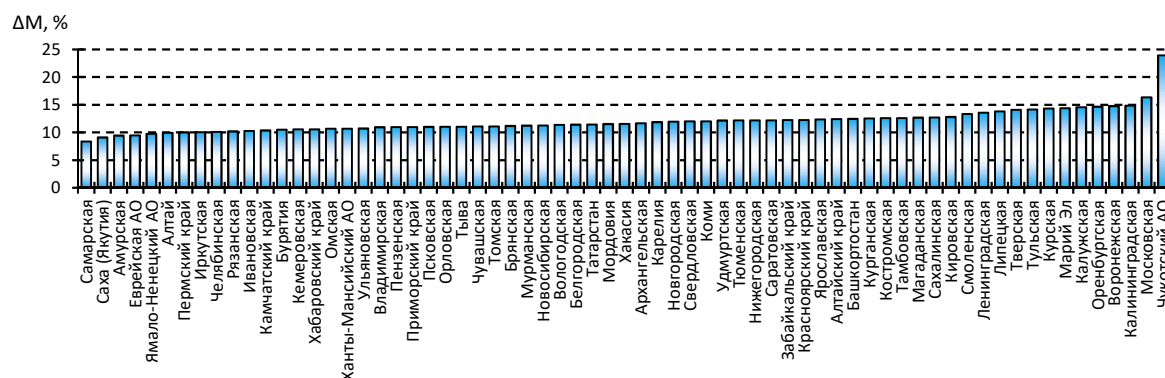


Рис. 6. Доля разницы между запасом на 1 га, вычисленным по методу объёмных таблиц и запасом, ограниченным полнотой 1,0 по стандартным таблицам

Fig. 6. Percentage of the difference between the growing stock per hectare calculated using the volume table method and the growing stock limited by the normality level of 1.0 in conformity with the standard tables

Средний запас на 1 га, вычисленный методом объёмных таблиц, по большинству субъектов превышает на 10–15 % по сравнению с запасом, ограниченным по полноте до 1,0, максимальные превышения 23,9 % в Чукотском АО и 16,3 % в Московской области, наименьшие – 8,3 и 9,1 % (Самарская область и Республика Саха (Якутия), в среднем (средневзвешенное от площади) – 10,9 % (рис. 6).

Указанные отклонения по запасу можно считать объективным фактором, влияющим на величину недоучтённого запаса древесины при производственной таксации лесов, связанных с нормативным ограничением относительной полноты до 1,0.

Как показывают результаты первого цикла работ по государственной инвентаризации лесов, 10,9 % лесов имеют полноту более единицы.

Представление о том, что древостой с полнотой 1,0 – это древостой с максимально возможным запасом, приводит к тому, что при производственной таксации специалисты на подсознательном уровне сравнивают таксируемый древостой с максимально загущённым, встретившимся им в регионе лесоустроительных работ. Это приводит к тому, что весь ряд полнот за счёт субъективного фактора смещается в сторону занижения.

Обобщая вышесказанное, отметим, что общий процент недоучтённого запаса древесины составил 31,3 %, а по объективным

причинам, связанным с нормативным ограничением величины полноты, – 10,9 %, то можно предположить, что по субъективным причинам величина недоучтённой древесины при производственной таксации составляет 20,4 %.

Данные ГИЛ основаны на перечислительно-измерительных способах таксации. Расчётный объём случайной выборки обеспечивает статистическую целевую погрешность определения общего запаса древесины по РФ $\pm 1\%$ с доверительной вероятностью 0,95, а по лесным районам в зависимости от процента лесистости от ± 1 до $\pm 10\%$ (преимущественно от ± 1 до $\pm 5\%$). По завершению первого цикла работ расчётная погрешность определения запаса древесины не превысила целевую [6].

На основе изложенного можно сделать вывод о том, что одна из основных причин более низкого запаса древесины по данным ГЛР, по отношению к запасам, определённым в ходе работ ГИЛ, связана с систематическим занижением относительной полноты, соответственно и запаса, при таксации лесов в ходе выполнения лесоустроительных работ.

Выводы. По результатам математико-статистического анализа материалов ППП первого цикла ГИЛ и данных ГЛР на 01.01.2023 выявлено следующее.

1. На основе измерений таксационных показателей древостоев по ярусам

и элементам леса на 97 ППП в Республике Марий Эл установлено: а) в случайных выборочных совокупностях по таксационным показателям с использованием критерия Аббе на уровне значимости $\alpha = 0,01$ и $\alpha = 0,05$ систематических погрешностей не обнаружено; б) на уровне значимости $\alpha = 0,05$ ед. по правилу Томпсона установлено, что таксационные характеристики имеют резко выделяющиеся значения на пяти ППП из 97.

2. Статистическая обработка материалов 97 пробных площадей показала, что точность оценки средних значений запаса по общей совокупности ПП составляет 8,2 %, а средняя точность по элементам леса 15,0 %. Таким образом, для сравнительной оценки таксационных показателей древостоев на различных территориальных уровнях можно использовать обобщающие выборочные совокупности и их статистики, в том числе показатели полноты и запаса древостоев с заданной точностью.

3. В целом по обобщённым совокупностям средневзвешенных относительных полнот древостоев по площади в 69 субъектах РФ изменчивость принимает значение 47,5 % (21,6–103,9 %) по материалам ГИЛ и 27,1 % (2,4–30,9 %) по данным ГЛР.

4. Существенность различия относительных полнот по данным ГИЛ и ГЛР приведена по субъектам РФ на двух уровнях

значимости. Установлено, что средние относительные полноты в 30 регионах существенно не различаются на уровне значимости $\alpha = 0,05$, а в остальных 39 субъектах РФ различия существенны.

5. Границы и средние значения погрешностей определения относительной полноты с учётом правила Томпсона более выражены на уровне значимости 0,05. При этом различия абсолютных значений относительных полнот, вычисленных по материалам ГИЛ на уровне значимости 0,05 и исходной выборки, по РФ составляют 5,3 %.

6. Основной причиной расхождения запасов, полученных по данным ГЛР и ГИЛ, является нормативное, не выше 1,0 ограничение относительной полноты древостоев, что приводит к недоучёту запаса древесины на 10,9 % и связанное с этим ограничением систематическое занижение запаса при таксации высокополнотных древостоев на 20,4 % в ходе лесоустроительных работ.

7. Статистический анализ агрегированных материалов 57 500 ППП ГИЛ позволил определить, что точность оценки средних относительных полнот древостоев по 69 субъектам РФ принимает значения в пределах от 0,2 до 3,6 %, а по данным ГЛР – от 0,1 до 1,0 %. В целом для РФ по материалам ГИЛ точность определения запаса древостоев равна 0,25 % и относительной полноты 0,2 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Богословский С. А., Зиновьев В. П. Статистический метод учёта лесных ресурсов. М.-Л.: Гос. лесное техн. изд-во, 1932. 120 с.

2. Гусев Н. Н. Статистические методы лесоучётных работ в СССР и за рубежом: обзорная информация. М.: ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1979. 45 с.

3. Анализ зарубежного опыта национальных инвентаризаций лесов: методы, выборка, результаты и международная статистика / Н. В. Малышева, А. Н. Филиппчук, Т. А. Золина и др. // Лесохозяйственная информация. 2022. № 2. С. 90–132. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.08; EDN: UKEGFS

4. Антанайтис В. В., Репишис И. Н. Опыт инвентаризации лесов Литвы математико-статистическим методом. М: Лесная промышленность, 1973. 104 с.

5. Аналитический обзор количественных и качественных характеристик лесов Российской

Федерации: итоги первого цикла государственной инвентаризации лесов / А. Н. Филиппчук, Н. В. Малышева, Т. А. Золина и др. // Лесохозяйственная информация. 2022. № 1. С. 5–34. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.01; EDN: DWYGQL

6. Анализ результатов первого цикла государственной инвентаризации лесов и предложений по совершенствованию методики её проведения во втором цикле / А. М. Бердов, С. В. Фёдоров, А. А. Приставко и др. // Лесохозяйственная информация. 2020. № 3. С. 67–80. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.06; EDN: AEHDDD

7. Growing stock monitoring by European National Forest Inventories: Historical origins, current methods and harmonization / T. Gschwantner, I. Alberdi, S. Bauwens et al. // Forest Ecology and Man-

agement. 2022. Vol. 505. Art. 119868. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119868

8. The role of European National Forest Inventories for international forestry reporting / C. Vidal, I. Alberdi, J. Redmond et al. // *Annals of Forest Science*. 2016. Vol. 73. Iss. 4. Pp. 793–806. DOI: 10.1007/s13595-016-0545-6

9. Waggoner P. E. Forest Inventories: Discrepancies and Uncertainties. Discussion Paper. Washington: Resources for the Future. 2009. 42 p. URL: <http://www.rff.org/RFF/Documents/RFF-DP-09-29.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).

10. Precision of exogenous post-stratification in small-area estimation based on a continuous national forest inventory / H. Naakana, J. Heikkinen, M. Katila et al. // *Canadian Journal of Forest Research*. 2020. Vol. 50. No 4. Pp. 359–370. DOI: 10.1139/cjfr-2019-0139

11. The Second National Forest Inventory, Republic of Ireland. Main Findings. Covering the National Forest Inventory, 2009 to 2012. Forest Service. Department of Agriculture, Food and the Marine. Johnstown Castle Estate, Co. Wexford, Ireland. 2013. 54 p. URL: <http://www.medpartnership.com/wp-content/uploads/2018/07/The-Second-National-Forest-Inventory-Main-Findings.pdf> (дата обращения: 10.01.2024).

12. Muller P. H., Neumann P., Storm R. *Tafeln der mathematischen Statistik*. Leipzig: Fachbuchverlag, 1979. 276 p.

13. Красиков И. И. Строение лесного массива Каа-Хемского района Республики Тыва по полноте

древостоев // *Лесная таксация и лесоустройство*. 2008. № 2 (40). С. 57–61. EDN: RUSFLX

14. Ефремова М. Н., Шевелев С. Л. Особенности строения лесных массивов в Красноярско-Ачинско-Канском лесостепном районе // *Хвойные бореальной зоны*. 2016. Т. 34, № 5–6. С. 298–302. EDN: YTBFRX

15. Фарбер С. К., Брюханов Н. В. Материалы массовой таксации и Государственной инвентаризации лесов: характеристика расхождений, причины, анализ // *Сибирский лесной журнал*. 2014. № 5. С. 16–28. EDN: TDQEW

16. Федосимов А. Н., Чуенков В. С., Копытов Ю. В. Математико-статистический метод учёта лесного фонда // *Сб. работ по лесному хозяйству ВНИИЛМ*. Вып. 53. М.: ВНИИЛМ, 1971. С. 74–85.

17. Филичук А. Н., Моисеев Б. Н., Югов А. Н. Сравнительная оценка статистических данных о запасах древостоев в лесах Российской Федерации // *Лесохозяйственная информация*. 2017. № 2. С. 16–25. DOI: 10.24419/LHI.2304–3083.2017.2.02; EDN: YLSNVC

18. Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г. Что мы знаем о лесах России сегодня? // *Лесная таксация и лесоустройство*. 2011. № 1–2(45–46). С. 154–173. EDN: RPCOXN

19. Черных В. Л., Бессчётнов В. П., Вдовин Е. С. Динамика лесных страт и точность оценки запаса на примере инвентаризации лесов Учебно-опытного лесничества Республики Марий Эл // *Вестник Марийского государственного технического университета*. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 3. С. 10–16. EDN: OPFDBV

Статья поступила в редакцию 10.02.2024; одобрена после рецензирования 10.03.2024; принята к публикации 25.03.2024

Информация об авторах

ЧЕРНЫХ Валерий Леонидович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – проблемы таксации леса, лесоустройства, математического моделирования и ГИС-технологий. Автор 260 научных публикаций. ORCID: 0000-0002-3620-8300; SPIN-код: 3218-2031

ПОВАРОВ Евгений Дмитриевич – инженер лесного хозяйства, Рослесинфорг. Область научных интересов – лесоустройство, лесная таксация, ГИС-технологии в лесном хозяйстве. Автор двух научных публикаций.

ФЁДОРОВ Станислав Витальевич – начальник Управления государственной инвентаризации и учёта лесов, Рослесинфорг. Область научных интересов – лесоустройство, лесная таксация, ГИС-технологии в лесном хозяйстве. Автор пяти научных публикаций.

ЧЕРНЫХ Леонид Валерьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – таксация леса, лесоустройство, лесовосстановление, аэрокосмические методы ГИС-технологий. Автор 30 научных публикаций. SPIN-код: 1832-1470

ЧЕРНЫХ Дмитрий Валерьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – лесоустройство, лесная таксация, аэрокосмические методы и ГИС-технологии в лесном хозяйстве. Автор 28 научных публикаций. SPIN-код: 1830-6301

ФОМИН Антон Сергеевич – аспирант, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – лесоустройство, лесная таксация, ГИС-технологии в лесном хозяйстве. Автор пяти научных публикаций.

Вклад авторов:

Черных В. Л. – научное руководство; концепция исследования; методология исследования, составление статьи; статистический анализ; окончательное утверждение версии для публикации.

Поваров Е. Д. – участие в разработке методики и её реализации; информационный поиск; проведение статистического анализа; подготовка исходного текста.

Фёдоров С. В. – участие в разработке методики и её реализации, проверка данных и результатов статистического анализа.

Черных Л. В. – участие в полевых работах, реализации методики исследований; информационный поиск; редактирование текста.

Черных Д. В. – участие в реализации методики исследований; информационный поиск.

Фомин А. С. – участие в сборе экспериментальных данных, визуализация результатов исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630.9

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.6>

EDN: INDOJL

**State Forest Inventory in the Russian Federation:
Variability and Accuracy of the Growing Stock Estimation**

V. L. Chernykh^{1✉}, E. D. Povarov², S. V. Fedorov², L. V. Chernykh¹, D. V. Chernykh¹, A. S. Fomin¹

¹ Volga State University of Technology,

3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

² Roslesinforg,

45, Volgogradsky Prosp., bld.1, Moscow, 109316, Russian Federation

ChernyhLV@volgatech.net^{1✉}

ABSTRACT

Introduction. Sustainable forest management in any country is impossible without up-to-date and reliable forest data. At present, one of the methods of forest resource accounting is the state forest inventory (SFI) based on the point estimates of data collected from permanent sample plots (PSPs). The first cycle of SFI in Russia ended in 2020. The large amount of the growing stock data obtained by using the sample method requires in-depth analysis. **The purpose of the work** is to assess the variability and accuracy of the average values of the relative completeness of stands and the growing stock volume on the basis of PSP materials, as well as identify the causes of discrepancies between the relative completeness and growing stock estimates calculated on the basis of data provided by the State Forest Register (SFR) and the materials of the first cycle of SFI carried out in 69 constituent entities of the Russian Federation.

Objects and methods. The object of the study was the forests of the Russian Federation. The research was based on the SFR materials as of January 1, 2023 and the results of measuring 57.5 thousand PSPs laid down in compliance with the SFI methodology. The sample data were analyzed using the Abbe criterion, the Thompson's rule, t-distribution, cumulative curves, and regression models. **Results.** Tests for homogeneity of the SFI PSP taxation indices were performed along with testing the hypothesis on the equality of the relative completeness averages computed on the basis of SFI and SFR materials using the t-test for statistical significance of the difference at a significance level of 0.05. The causes of discrepancies between the growing stock estimates based on the SFR and SFI data were explained. **Conclusions.** On the whole, for the generalized aggregates of the relative completeness area-weighted averages in 69 constituent entities of the Russian Federation, variability is 47.5 % (21.6-103.9 %) according to the SFI data and 27.1 % (2.4-30.9 %) according to the SFR data. For 30 Federal subjects of Russia, the relative completeness estimates based on the SFI and SFR data do not differ significantly at a significance level of $\alpha=0.05$, while for the remaining 39 Federal subjects, such differences have been statistically proven. The accuracy of the relative completeness estimation by constituent entity of the Russian Federation has been determined. It ranges from 0.2 to 3.6 % according to the SFI PSP data, and from 0.1 to 1.0 % according to the SFR data. For the Russian Federation in general, based on the SFI data, the accuracy of the growing stock volume estimates is 0.25 % and the accuracy of the relative completeness estimates is 0.20 %.

Keywords: forest inventory; permanent sample plots; taxation; statistics; sampling population; stock; cumulative curve; Abbe criterion; Thompson's rule

REFERENCES

1. Bogoslovsky S. A., Zinoviev V. P. Statistical method of forest resources inventory. Moscow; Leningrad: Goslestehizdat, 1932. 120 p. (In Russ.).
2. Gusev N. N. Statistical methods of forest accounting in the USSR and abroad: Overview information. Moscow: TsBNTI Gosleshoza USSR (Central Bureau Sci. Techn. Inform. St. For. USSR), 1979. 45 p. (In Russ.).
3. Malysheva N. V., Filipchuk A. N., Zolina T. A. et al. Analysis of foreign experience in national forest inventories: methods, sampling, results and international statistics. *Forestry Information*. 2022. No 2. Pp. 90–132. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.08; EDN: UKEGFS (In Russ.).
4. Antanaitis V. V., Repshis I. N. Experience of Forest Inventory in Lithuania by the Mathematical-Statistical Method. Moscow: Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1973. 104 p. (In Russ.).
5. Filipchuk A. N., Malysheva N. V., Zolina T. A. et al. Analytical review of the quantitative and qualitative characteristics of forests in the Russian Federation: results of the first cycle of the state forest inventory. *Forestry Information*. 2022. No 1. Pp. 5–34. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.01; EDN: DWYGQL (In Russ.).
6. Berdov A. M., Fedorov S. V., Pristavko A. A. et al. Experience in conducting the GIL of the Russian Federation and improving the National forest inventory in the second cycle. *Forestry Information*. 2020. No 3. Pp. 67–80. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.06; EDN: AEHDDD (In Russ.).
7. Gschwantner T., Alberdi I., Bauwens S. et al. Growing stock monitoring by European National Forest Inventories: Historical origins, current methods and harmonization. *Forest Ecology and Management*. 2022. Vol. 505. Art. 119868. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119868
8. Vidal C., Alberdi I., Redmond J. et al. The role of European National Forest Inventories for international forestry reporting. *Annals of Forest Science*. 2016. Vol. 73. Iss. 4. Pp. 793–806. DOI: 10.1007/s13595-016-0545-6
9. Waggoner P. E. Forest Inventories: Discrepancies and Uncertainties. Discussion Paper. Washington: Resources for the Future, 2009. 42 p. URL: <https://media.rff.org/documents/RFF-DP-09-29.pdf> (reference date: 10.01.2024).
10. Haakana H., Heikkinen J., Katila M. et al. Precision of exogenous post-stratification in small-area estimation based on a continuous national forest inventory. *Canadian Journal of Forest Research*. 2020. Vol. 50. No 4. Pp. 359–370. DOI: 10.1139/cjfr-2019-0139
11. The Second National Forest Inventory, Republic of Ireland. Main Findings. Covering the National Forest Inventory, 2009 to 2012. Co. Wexford, Ireland: Forest Service. Department of Agriculture, Food and the Marine. Johnstown Castle Estate, 2013. 54 p. URL: <http://www.medpartnership.com/wp-content/uploads/2018/07/The-Second-National-Forest-Inventory-Main-Findings.pdf> (reference date: 10.01.2024).
12. Muller P. H., Neumann P., Storm R. Tafeln der mathematischen Statistik. Leipzig: Fachbuchverlag, 1979. 276 p. (In Germ.).
13. Krasikov I. I. The structure of the wooded area of the Kaa-Khemsy District in Tyva Republic in terms of the normality of forest stands. *Forest inventory and Forest Planning*. 2008. No 2 (40). Pp. 57–61. EDN: RUSFLX (In Russ.).
14. Efremova M. N., Shevelev S. L. Features of the structure of forest massifs in the Krasnoyarsk-Achinsk-Kansk Forest-Steppe Area. *Conifers of the Boreal Area*. 2016. Vol. 34. Iss. 5–6. Pp. 298–302. EDN: YTBFRX (In Russ.).
15. Farber S. K., Bryuhanov N. V. Mass Forest survey and state forest inventory: specification of the discrepancies, causes, analysis. *Siberian Journal of Forest Science*. 2014. No 5. Pp. 16–28. EDN: TDQWEP (In Russ.).
16. Fedosimov A. N., Chuenkov V. S., Kopytov Y. V. Mathematical and statistical method of forest fund accounting. *Collection of works on forestry of All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (VNIILM)*. Iss. 53. Moscow: VNIILM Publ., 1971. Pp. 74–85. (In Russ.).
17. Filipchuk A. N., Moiseev B. N., Yugov A. N. Comparative Assessment of Statistics on Growing Stock in Forests of Russian Federation. *Forestry Information*. 2017. No 2. Pp. 16–25. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2017.2.02; EDN: YLSNVC (In Russ.).
18. Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. What do we know about Russian forests today? *Forest Inventory and Forest Planning*. 2011. No. 1–2 (45–46). Pp. 154–173. EDN: RPCOXN (In Russ.).
19. Chernykh V. L., Besschetnov V. P., Vdovin E. S. Forest stratum dynamics and wood stock estimation on the example of forest inventory of Mari El Republic Scientific-Experimental Forestry. *Vestnik of the Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Environmental management*. 2011. No 3. Pp. 10–16. EDN: OPFDBV (In Russ.).

The article was submitted 10.02.2024; approved after reviewing 10.03.2024;
accepted for publication 25.03.2024

For citation: Chernykh V. L., Povarov E. D., Fedorov S. V., Chernykh L. V., Chernykh D. V., Fomin A. S. State Forest Inventory in the Russian Federation: Variability and Accuracy of the Growing Stock Estimation. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2024. № 1 (61). Pp. 6–29 (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.6>; EDN: INDOJL

Information about the authors

Valerii L. Chernykh – Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Chair of Forestry and Forest Management, Volga State University of Technology. Research interests – problems of forest inventory, forest management, mathematical simulation and GIS-technologies. Author of 260 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8805-1253>; SPIN: 3218-2031

Evgeny D. Povarov – Forestry Engineer, Roslesinform. Research interests – forest management, forest taxation, GIS technologies in forestry. Author of two scientific publications.

Stanislav V. Fedorov – Head of the Department of State Forest Inventory and Accounting, Roslesinform. Research interests – forest management, forest inventory, GIS technologies in forestry. Author of five scientific publications.

Leonid V. Chernykh – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Chair of Forestry and Forest Management, Volga State University of Technology. Research interests – forest taxation, forest management, reforestation, aerospace methods of GIS technologies. Author of 30 scientific publications. SPIN: 1832-1470

Dmitrii V. Chernykh – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Chair of Forestry and Forest Management, Volga State University of Technology. Research interests – forest management, forest inventory, aerospace methods and GIS technologies in forestry. Author of 28 scientific publications. SPIN: 1830-6301

Anton S. Fomin – Graduate student, Volga State University of Technology. Research interests – forest management, forest taxation, GIS technologies in forestry. Author of five scientific publications.

Contribution of the authors:

Chernykh V. L. – scientific guidance; research concept; research methodology, drafting the article; statistical analysis; approval of the final version of the manuscript for publication.

Povarov E. D. – participation in methodology development and implementation; information search; conducting statistical analysis; preparation of the initial draft of the manuscript.

Fedorov S. V. – participation in methodology development and implementation; verification of data and statistical analysis results.

Chernykh L. V. – participation in the field work, research methodology implementation; information search; text reviewing and editing.

Chernykh D. V. – participation in the research methodology implementation; information search; text reviewing and editing.

Fomin A. S. – participation in experimental data collection, visualization of research results.

The authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 630*58

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.30>

EDN: JHUADY

Оценка алгоритма «Случайный лес» машинного обучения для классификации фитомассы лесов

Д. М. Дергунов, О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов[✉], С. А. Лежнин, А. В. Губаев

Поволжский государственный технологический университет,

Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

kurbanovea@volgatech.net[✉]

Введение. Леса играют решающую роль в смягчении последствий изменения климата, защите биоразнообразия и обеспечении других экосистемных услуг, как чистый воздух и вода. Оценка и мониторинг наземной фитомассы лесов являются важными для понимания углеродного баланса, изменений их состояния и продуктивности с течением времени. **Цель** исследования – оценка алгоритма «Случайный лес» машинного обучения для классификации пространственного распределения надземной фитомассы по данным спутникового снимка Sentinel-2 на примере заказника «Сосновоборский» Пензенской области. **Объекты и методы.** Объектом исследования явились лесные насаждения заказника. На исследуемой территории, по данным лесоустройства и полевых работ, заложены 110 тестовых участков. Для моделирования пространственного распределения фитомассы использован ансамблевый метод машинного обучения «Случайный лес». Входными данными для модели были 12 спектральных каналов спутника Sentinel-2 и 7 вегетационных индексов. Для подбора значений оптимальных параметров модели «Случайный лес» использовалась программа GridSearchCV. Моделирование распределения фитомассы лесного насаждения по алгоритму «Случайный лес» проводилось с помощью интерактивной веб-среды с открытым исходным кодом Jupyter Notebook. **Результаты.** При использовании выбранных параметров алгоритма «Случайный лес» была получена оптимальная модель ($R^2=0,60$) распределения фитомассы по территории заказника. Плотность остатков прогнозируемых значений вокруг нуля и их близость к нормальному распределению свидетельствуют об её адекватности. Максимальную связь с фитомассой лесов показали 11 (SWIR), b5, b3, b12, b2 и b7 спектральные каналы снимка Sentinel-2. В итоге получена карта пространственного распределения фитомассы лесов по территории заказника. **Выводы.** Результаты показывают, что сочетание спектральных каналов Sentinel-2 и вегетационных индексов повышают точность оценки фитомассы лесных насаждений с использованием алгоритма машинного обучения «Случайный лес». Разработанный алгоритм может быть рекомендован для определения пространственного распределения надземной фитомассы в лесных экосистемах Пензенской области.

Ключевые слова: спутниковые снимки; Sentinel-2; вегетационные индексы; лесные насаждения; дистанционное зондирование; Пензенская область

Финансирование: работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-16-00094 «Дистанционный мониторинг лесных экосистем в условиях меняющегося климата», <https://rscf.ru/project/22-16-00094/>.

© Дергунов Д. М., Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Лежнин С. А., Губаев А. В., 2024

Для цитирования: Дергунов Д. М., Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Лежнин С. А., Губаев А. В. Оценка алгоритма «Случайный лес» машинного обучения для классификации фитомассы лесов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 1 (61). С. 30–43. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.30>; EDN: JHUADY

Введение. Лесные экосистемы играют жизненно важную роль в балансе наземного цикла углерода и могут способствовать смягчению последствий глобального изменения климата на жизнь человека [1]. В последние десятилетия этому направлению посвящено большое число исследований российских и зарубежных учёных [2–4]. Обобщённые результаты по региональным и глобальным оценкам депонирования углерода лесными насаждениями входят в отчёты межправительственной комиссии экспертов по изменению климата [5]. Эффективность и точность подобных исследований в значительной степени связана с использованием современных информационных технологий и методов обработки больших данных.

Основным общепризнанным фактором, определяющим скорость и объём депонирования углерода лесными экосистемами, является их биологическая продуктивность, которая обычно выражается пространственно-временным распределением надземной фитомассы. Для определения фитомассы насаждений с течением времени использовались разные методические решения. Традиционные полевые исследования предоставляют основные таксационные данные (диаметр, высоту, полноту, возраст) деревьев, что позволяет точно определять фитомассу насаждения с использованием аллометрических уравнений, но для этого требуются значительные временные и финансовые затраты [6]. В связи с этим для решения этого вопроса всё чаще используются данные дистанционного зондирования (ДЗЗ). Наиболее точными для этих целей являются лидарные технологии, позволяющие оценивать вертикальную структуру насаждения, а также радарная съёмка с синтезированной апертурой [7–9]. Оптические данные дистанционного зондирования с высоким пространственным разрешением также позволяют получать важную спектральную информацию и проводить мониторинг растительного покрова на больших территориях [10–12].

В последние годы для оценки фитомассы лесного покрова всё большее применение находят спутники Sentinel Европейского космического агентства в рамках программы Copernicus [13]. Sentinel-2 – миссия, направленная на изучение земной поверхности с помощью широкополосных мультиспектральных спутников высокого разрешения Sentinel-2A и Sentinel-2B. Мультиспектральный сенсор MSI Sentinel-2 (*англ.* MultiSpectral Instrument) сканирует поверхность земли в 13 спектральных диапазонах, от видимого до коротковолнового инфракрасного электромагнитного спектра. Группы диапазонов имеют различное пространственное разрешение: четыре спектральных канала имеют 10-метровое пространственное разрешение, шесть каналов – 20-метровое разрешение, и два канала – 60-метровое разрешение [14]. Этот сенсор нашёл широкое применение в мониторинге лесного покрова, а также для оценки запасов леса и ущерба от пожаров [15–17].

Для оценки надземной биомассы (фитомассы) AGB (*англ.* above ground biomass) с использованием ДЗЗ широкое применение находят алгоритмы машинного обучения, позволяющие идентифицировать ключевые спектральные и текстурные переменные [18]. Использование методов машинного обучения также способствует более эффективной обработке спутниковых данных [19, 20], в том числе при оценке фитомассы лесов [21]. Обычно при современных исследованиях применяют такие методы машинного обучения, как дерево решений (*англ.* Decision tree), ближайшего соседа (*англ.* Nearest Neighbor), искусственная нейронная сеть ANN (*англ.* Artificial Neural Network) и метод опорных векторов SVM (*англ.* Support Vector Machine), «Случайный лес» RF (*англ.* Random Forest). Эффективность каждого из этих методов машинного обучения зависит от сложности взаимосвязи между фитомассой и данными дистанционного зондирования [22, 23].

Цель данного исследования – оценить алгоритм машинного обучения «Случайный лес» для классификации пространственного распределения надземной фитомассы лесного покрова по спектральным каналам Sentinel-2 и серии спектральных индексов на примере заказника «Сосновоборский» Пензенской области. Для этого были решены следующие **задачи**:

1) заложены тестовые участки на территории исследования;

2) получены тематические карты вегетационных индексов по спутниковым снимкам на территорию заказника;

3) подобраны оптимальные параметры для моделирования фитомассы по алгоритму «Случайный лес» машинного обучения;

4) проведена оценка полученной модели и создана карта распределения плотности фитомассы на территории заказника.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились на территории государственного природного зоологического заказника регионального значения «Сосновоборский» Пензенской области (рис. 1). Общая площадь исследуемой территории составляет 8 067 га.

Заказник является особо охраняемой природной территорией регионального значения, предназначенной для сохранения и восстановления редких и исчезающих видов животных, в том числе ценных видов в хозяйственном, научном и культурном отношении, и среды их обитания¹. Задача заказника – особая охрана редких и исчезающих видов животных, а также выполнение функции по сохранению и восстановлению ценных в хозяйственном, научном и культурном отношении охотничьих ресурсов и их воспроизводство (<http://www.oopt.aari.ru/oopt/>).



Рис. 1. Расположение тестовых участков на исследуемой территории

Fig. 1. Location of test sites in the study area

¹ О Внесении изменений в постановление правительства Пензенской области от 13.12.2017 N 604-пп (с последующими изменениями). Постановление правительства Пензенской области от 13.09.2021 № 587-пп [Электронный ресурс] URL: <https://clck.ru/33ujz7>

Во время полевых исследований в 2022 году на территории заповедника было заложено 20 тестовых участков (ТУ) в древостоях различных по таксационным характеристикам. Кроме того, по данным последнего лесоустройства были подобраны 90 ТУ с описанием их основных дендрометрических показателей и привязкой на местности. В целом в работе для классификации и оценки точности были подобраны 40 ТУ в хвойных, 38 в лиственных, 16 в смешанных и 16 на не покрытых лесом участках. Для каждого исследуемого насаждения были определены следующие таксационные показатели: средний возраст, высота и диаметр, породный состав и полнота. Эти данные были использованы для определения запаса насаждений с помощью таблиц для таксации лесов [24]. Полученные данные по запасам насаждений пересчитывались в фитомассу с помощью существующих конверсионных коэффициентов для региона исследования [25, 26].

В работе был использован спутниковый снимок Sentinel-2B MSI L2A T38 UNE от 26 июня 2022 года, полученный с электронного ресурса открытого доступа Copernicus (Sentinels Scientific Data Hub), <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Для учёта влияния атмосферы и устранения геометрического искажения исходное спутниковое изображение было скорректировано в модуле Sen2Cor, встроенном в программное обеспечение SNAP.

В работе был применён алгоритм машинного обучения «Случайный лес» [27], который основан на комбинировании выходных данных нескольких ансамблей деревьев решений, что позволяет получать оптимальное качество классификации спутниковых изображений. Это гибкий и простой в использовании алгоритм, который можно применять как для задач классификации, так и для задач регрессионного анализа [28, 29]. «Случайный лес» также используется учёными при расчётах фитомассы лесных насаждений путём объединения нескольких деревьев реше-

ний и оптимизации их прогнозов [30]. Алгоритм «Случайный лес» позволяет выявлять сложную нелинейную связь между растительным покровом и изображениями ДЗЗ с неопределённым набором данных, а также способен оптимально комбинировать данные из разных источников для повышения точности прогноза [31, 32]. В данном исследовании для разработки модели «Случайного леса» по оценке фитомассы лесного насаждения использовалась интерактивная веб-среда с открытым исходным кодом Jupyter Notebook, которая позволяет пользователям создавать и обмениваться информацией, содержащей коды, уравнения, визуализацию и текст. Jupyter Notebook поддерживает более 40 языков программирования, включая Python, R, Julia и Scala [33]. Блок-схема последовательности работ в исследовании приведена на рис. 2.

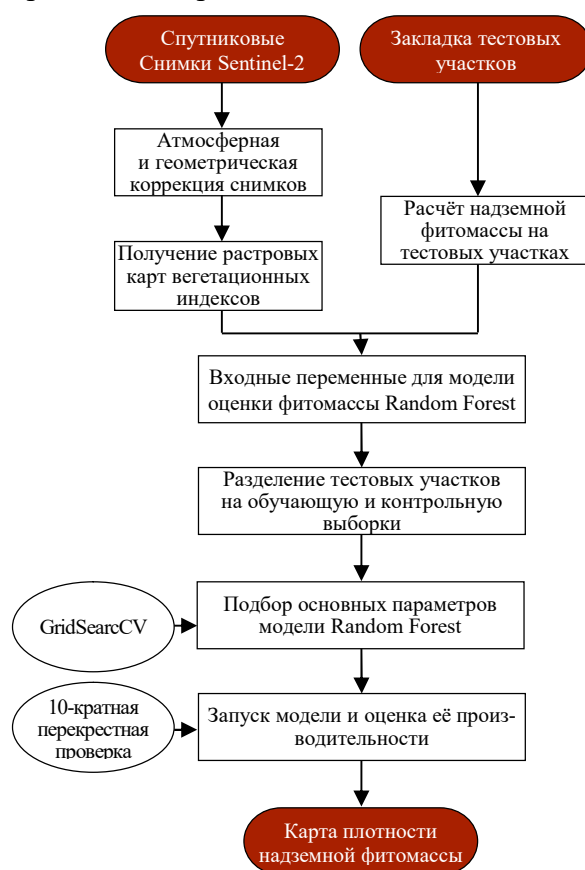


Рис. 2. Блок-схема оценки надземной фитомассы с помощью машинного обучения

Fig. 2. Flowchart of estimating above-ground phytomass using machine learning

В качестве входных параметров в модель оценки фитомассы лесных насаждений были использованы данные, полученные как из спектральных каналов MSI Sentinel-2, так и вегетационных индексов на территорию исследования. Для этого были использованы: нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Differenced Vegetation Index), расширенный вегетационный индекс EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index), вегетационный индекс с поправкой на почву SAVI (*англ.* Soil adjusted vegetation index), нормализованный разностный индекс влажности NDMI (*англ.* Normalized Differenced Moisture Index), относительный индекс вегетации RVI (*англ.* Ratio Vegetation Index), нормализованный индекс вегетации по краевому диапазону красной зоны спектра NDVI_{re} (*англ.* Red-edge Normalized Difference Vegetation Index), индекс хлорофилла по краевому диапазону красной зоны спектра Cl_{re} (*англ.* Red-edge Chlorophyll Index) (табл.). На первом этапе проведено разделение тестовых участков на обучающую (77 ТУ) и контрольную выборки (33 ТУ).

Далее проводился подбор основных параметров модели «Случайный лес» для оптимизации её производительности:

Вегетационные индексы, используемые в алгоритме «Случайный лес»

Vegetation indices used in the Random Forest algorithm

Индексы	Формула спектральных каналов	Источник
NDVI	$\frac{Band8 - Band4}{Band8 + Band4}$	[35]
EVI	$2,5 \times \frac{Band8 - Band4}{Band8 + 6 \times Band4 - 7,5 \times Band4}$	[36]
SAVI	$(1 + 0,5) \times \frac{Band8 - Band4}{Band8 + Band4 + 0,5}$	[37]
NDMI	$\frac{Band8 - Band11}{Band8 + Band11}$	[38]
RVI	$\frac{Band8}{Band4}$	[39]
NDVI _{re}	$\frac{Band8 - Band5}{Band8 + Band5}$	[40]
Cl _{re}	$\frac{Band8}{Band5} - 1$	[41]

• *n_estimators* – количество деревьев решений в алгоритме Random Forest. Увеличение количества деревьев может повысить точность модели, что в свою очередь приводит к излишней по времени обработке данных на её оптимизацию;

• *max_features* – количество независимых переменных (случайных подмножеств), выбранных случайным образом для использования при каждом решении в RF. Это может быть фиксированное число или доля от общего количества переменных (например, двоичный логарифм от числа переменных – $\log_2$, квадратный корень от числа переменных – $\sqrt{}$). Меньшее значение этого показателя может снизить время на переобучение, а большее повысить точность модели;

• *max_depth* – определяет максимальную глубину (величину), до которой может проходить оптимизация изучаемого дерева решения. Это один из самых важных параметров, когда речь идёт о повышении точности модели. Увеличение этого показателя приводит к повышению точности модели до определённого предела, после которого она начинает постепенно снижаться в связи с её переобучением. Поэтому при таких исследованиях важно изначально корректно установить его значение, чтобы избежать процесса переобучения [34].

Выбор количества параметров – одна из важных задач при построении модели машинного обучения, потому что изменение параметров модели может принципиально повлиять на её качество и время на её обработку. Для подбора параметров алгоритма «Случайного леса» в веб-среде с открытым исходным кодом Jupyter Notebook используется метод поиска по программе GridSearchCV, который автоматически подбирает параметры машинного обучения и создаёт оптимальный набор для каждой из возможной комбинации. Поиск по программе GridSearchCV включает проверку диапазона значений параметров `n_estimators`, `max_features` и `max_depth`. После этого выбирается комбинация этих параметров, обеспечивающая максимальную производительность модели.

Заключительным этапом работ является запуск модели и оценка её эффективности. Для этого в работе использована десятикратная перекрёстная проверка, при которой набор данных разделён на десять частей, каждая из которых содержала одинаковое количество тестовых участков. В процессе моделирования на каждом этапе одна часть данных выбиралась в качестве тестового набора данных, а остальные девять частей использовались в качестве обучающих моделей для прогнозирования целевого значения [42, 43]. Такая процедура проводилась десять раз для каждого набора наблюдений. Статистические характеристики модели «Случайный лес» оценивали с помощью коэффициента детерминации (R^2), среднеквадратичной ошибки RMSE (*англ.* Root mean square error) и средней абсолютной ошибки MAE (*англ.* Mean absolute error).

Результаты исследования и их обсуждение. В работе на основе модуля GridSearchCV были получены оптимальные значения параметров модели «Случайный лес» по оценке фитомассы лесных

насаждений заповедника «Сосновоборский» по данным вегетационных индексов: `n_estimators = 500`, `max_features = sqrt`, `max_depth = 10`. Как видно из рис. 3, *а*, R^2 достигает максимальных значений при увеличении числа «деревьев решений» до 500 штук. Затем наблюдается его небольшое снижение в связи с процессом переобучения модели. Распределение значений R^2 оказалось одинаково для `log2` и `sqrt`, поэтому выбор значения параметров `max_features` может быть любым. На рис. 3, *б* видно резкое повышение R^2 при увеличении параметра `max_depth` числа «деревьев решений» с 0 до 3, затем наблюдается относительная стабилизация зависимости при их увеличении до 10. Максимальный показатель `max_depth` «дерева решений» позволяет разделить каждый исследуемый узел (*англ.* Node) на оптимальное количество наблюдений, что приводит к получению более точных данных по фитомассе насаждений.

Интеграция оптимальных значений параметров в модель «Случайного леса» с использованием наборов данных ТУ для обучения и тестирования позволила получить следующие статистики: $R^2=0,60$, $MAE=17,6$ т/га, $RMSE=20,9$ т/га, что достаточно для формирования модели расчёта фитомассы на территории исследования. На рис. 4 показано распределение данных фитомассы, сгенерированных по алгоритму «Случайный лес» и по тестовым участкам, на территории заказника «Сосновоборский». Отдельные прогнозные значения фитомассы (в виде точек) располагаются близко к оптимальной модели (сплошная линия). В целом, на рис. 4 наблюдается низкий уровень дисперсии в модели «Случайный лес» в сравнении с оптимальной линией, в которой распределение точно соответствует модели, что свидетельствует о приемлемом качестве принятой модели для оценки фитомассы.

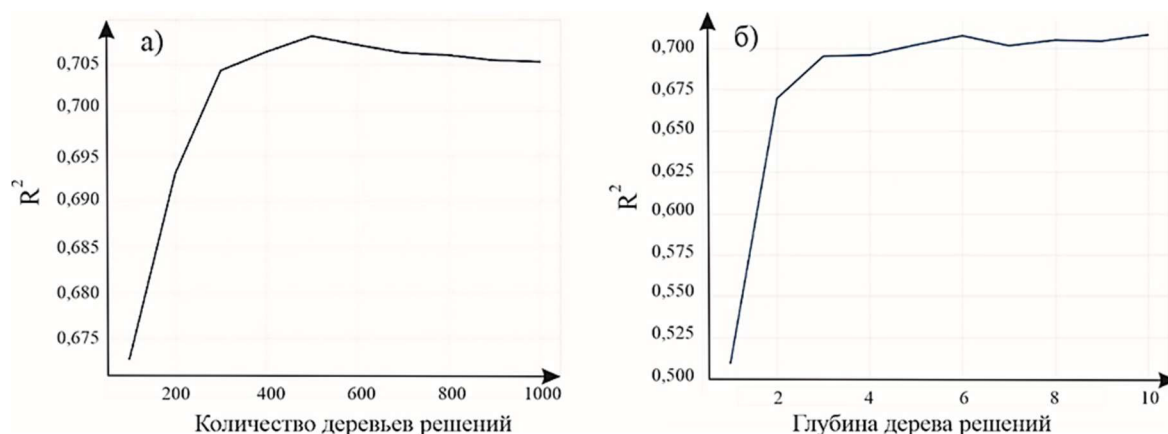


Рис. 3. Распределение значений R^2 по параметрам модели «дерево решений»: а) $n_estimators$; б) max_depth
 Fig. 3. Distribution of R^2 values by parameter of the Decision Tree model: а) $n_estimators$; б) max_depth

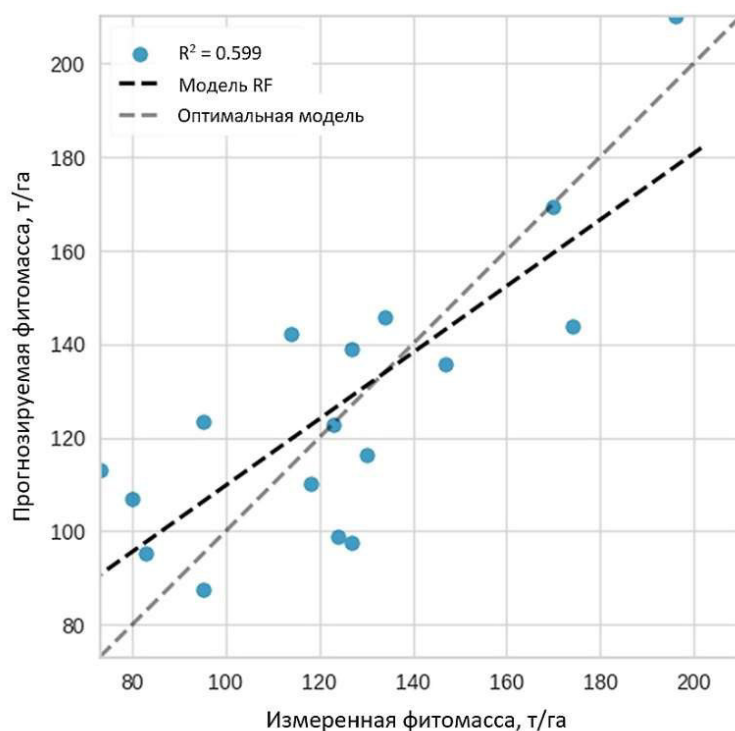


Рис. 4. Модели распределения и полевые данные фитомассы лесного покрова заказника «Сосновоборский»
 Fig. 4. Distribution of predicted and measured forest cover phytomass in the Sosnovoborsky nature reserve

На рис. 5 представлено распределение между фактическими и прогнозируемыми значениями фитомассы и остатками, случайно рассеянными вокруг нулевых значений. Гистограмма остатков демонстрирует нормальное распределение, а плотность прогнозируемых показателей также подтверждает адекватность модели (рис. 5). В работе установлено, что моделирование по алгоритму «Случайный лес» переоценивает небольшие значения фи-

томассы и недооценивает большие, что частично объясняет наличие систематической ошибки в прогнозе и указывает на проблему насыщения. Следует отметить, что проблемы завышения и занижения оценок до сих пор не удалось полностью устранить с помощью алгоритмов машинного обучения. Эта проблема также существовала в предыдущих исследованиях с непараметрическим алгоритмом оценки фитомассы [44].

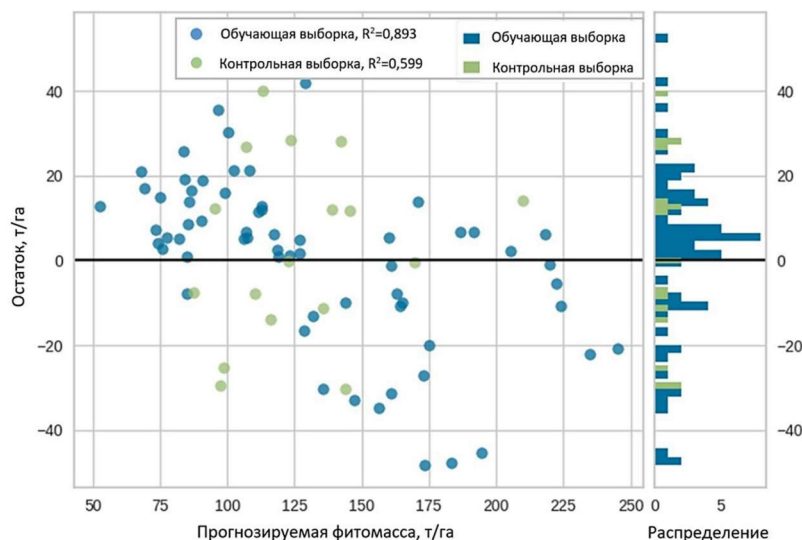


Рис. 5. График остатков, показывающий разницу между фактическими и моделируемыми значениями обучающей выборки (синий цвет) и контрольной выборки (зелёный цвет) фитомассы лесного покрова (т/га)

Fig. 5. Residue plot showing the difference between the actual and predicted values of the training sample (blue) and values of the control sample (green) of the forest cover phytomass (t/ha)

Оптимальные результаты модели оценки фитомассы могут быть объяснены использованием спектральных каналов Sentinel-2, которые лучшим образом фиксируют растительный покров, особенно в краевой красной зоне спектра Red Edge (каналы 5–7) (рис. 6). На рис. 6 показано распределение спектральных каналов и используемых в работе вегетационных индексов по их относительной важности при оценке фитомассы. Среди всех оцениваемых параметров, использованных в модели расчёта фитомассы по алгоритму «Случайный лес», максимум влияния оказывают значения спектральных показателей канала 11 (SWIR – коротковолновый

инфракрасный) и данные по b5, b3, b12, b2 и b7 каналам. При этом подходе машинного обучения вегетационные индексы показывают меньшее влияние на точность при оценке фитомассы. Это является серьёзным недостатком их использования, так как приводит к недооценке продуктивности районов с густыми лесами. Исследуемые индексы могут иметь низкую важность из-за своей высокой насыщенности в летний период, когда достигается пик вегетационного развития растений [45]. Для картографирования наземной фитомассы использовались показатели с относительной важностью более 50 %.

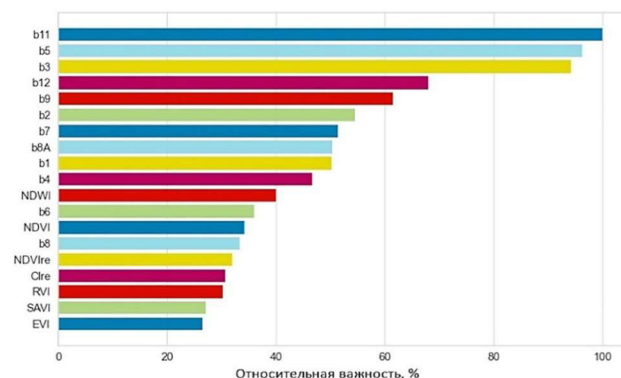


Рис. 6. Параметры модели, ранжированные в соответствии с объяснённой дисперсией, которую каждый из них вносит в модель

Fig. 6. Features ranked according to the explained variance that each feature contributes to the model

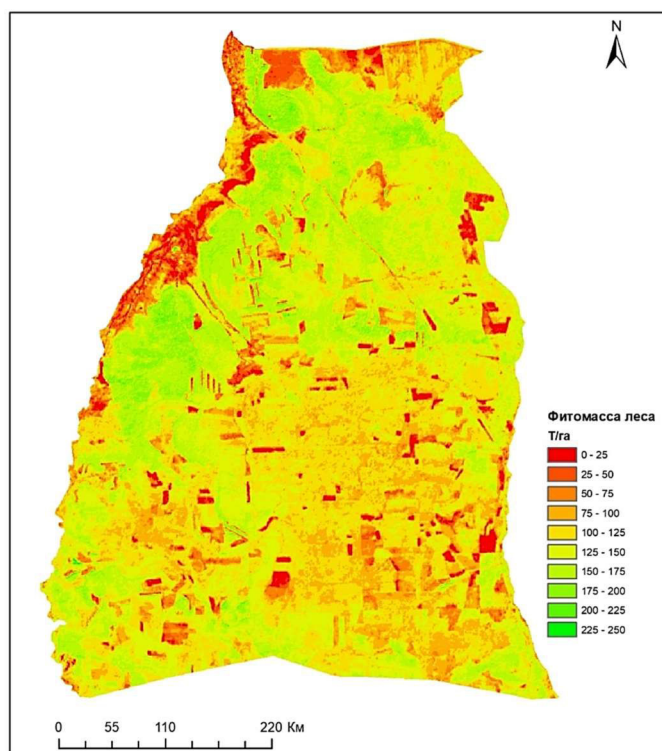


Рис. 7. Распределение фитомассы на исследуемой территории, полученной с использованием модели «Случайный лес»

Fig. 7. Phytomass distribution across the study area obtained using the Random Forest model

На рис. 7 представлена итоговая карта распределения фитомассы лесов заказника «Сосновоборский» Пензенской области, полученная на основе модели «Случайный лес» по данным спутниковых изображений и тестовых участков. Минимальные значения плотности фитомассы (красным цветом) наблюдаются на открытых участках заказника (вырубки, поля), сосредоточенных в основном в северной и северо-западной частях заказника. Также их небольшие участки можно найти в центральной части территории исследования. Максимальная плотность фитомассы лесных насаждений (светло-зелёный цвет), представленная в основном спелыми сосновыми насаждениями, сосредоточена в северной и центральной частях заказника.

Выводы. В работе проведена оценка набора спектральных каналов и вегетационных индексов, полученных по данным изображения Sentinel-2 MSI, с целью последующего моделирования распределения фитомассы в разновозрастных лесных ланд-

шафтах заказника «Сосновоборский» Пензенской области с помощью алгоритма машинного обучения «Случайный лес». Применение автоматического машинного обучения позволило ускорить процесс моделирования распределения фитомассы и оценку точности классификации спутниковых данных. Приемлемость использования алгоритма «Случайный лес» в таких оценках обусловлена возможностью использования нескольких значимых параметров спутниковых данных, необходимых для выбора наиболее оптимальной модели. В работе были использованы только два из них: спектральные каналы и вегетационные индексы.

Перспективным направлением оценки фитомассы с помощью машинного обучения является использование других источников данных ДЗЗ, таких как радиолокатор с синтезированной апертурой, гиперспектральные изображения с высоким пространственным разрешением, разновременные спутниковые данные для учёта сезонности, а также вспомогательные данные

(например, климат, почва и рельеф). Полученная модель может быть использована для более точного определения запасов депонированного углерода в лесных экосистемах Пензенской области по спутниковым данным. В свою очередь, это позволит

повысить точность оценки запасов углерода в лесных насаждениях на региональном уровне, что необходимо для выполнения Российской Федерацией обязательств по Парижскому соглашению об изменении климата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. By 2050 the Mitigation Effects of EU Forests Could Nearly Double through Climate Smart Forestry / G.-J. Nabuurs, P. Delacote, D. Ellison et al. // *Forests*. 2017. Vol. 8. Iss. 12. Art. 484. DOI: 10.3390/f8120484
2. Reichstein M., Carvalhais N. Aspects of Forest Biomass in the Earth System: Its Role and Major Unknowns // *Surveys in Geophysics*. 2019. Vol. 40. Iss. 4. Pp. 693–707. DOI: 10.1007/s10712-019-09551-x
3. Анализ трендов временных рядов вегетационных индексов по данным MODIS для оценки влияния засух на лесные насаждения Среднего Поволжья с 2000 по 2020 год / О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, Дж. Ша и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 4. С. 181–194. [Vorobyov O. N., Kurbanov E. A., Sha J. et al. Trend analysis of MODIS time series vegetation indices to assess the impact of droughts on forest stands in the Middle Volga from 2000 to 2020. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2022. Vol. 19. Iss. 4. Pp. 181–194.] DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-181-194; EDN: LIMGBP
4. Прогноз состояния лесных экосистем Среднего Поволжья с использованием самообучающихся моделей / С. А. Лежнин, А. В. Губаев, О. Н. Воробьев и др. // *Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг*. 2022. № 8. С. 95–107. [Lezhnin S. A., Gubaev A. V., Vorobiev O. N. et al. Forecasting the state of forest ecosystems in the Middle Volga region using self-learning models. *Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring*. 2022. No 8. Pp. 95–107.] DOI: 10.25686/10.25686.2022.48.81.010; EDN: PPMKHO
5. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p., DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
6. Consequences of Landsat Image Strata Classification Errors on Bias and Variance of Inventory Estimates: A Forest Inventory Case Study / M. K. Crosby, T. G. Matney, E. B. Schultz et al. // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. Vol. 10. Iss. 1. Pp. 243–251. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2597762
7. Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery / J. A. Castillo, A. A. Apan, T. N. Maraseni et al. // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. Vol. 134. Pp. 70–85. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.10.016
8. Combining LiDAR and hyperspectral data for aboveground biomass modeling in the Brazilian Amazon using different regression algorithms / C. T. Almeida, L. S. Galvao, L. E. O. C. Aragao et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 232. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111323
9. Регрессионные модели для оценки фитомассы древостоев на основе бортового лидара / В. А. Усольцев, И. С. Цепордей, В. П. Часовских и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2023. № 3 (59). С. 24–41. [Usoltsev V. A., Tsepordey I. S., Chasovskikh V. P. et al. Regression Models for Estimating the Phytomass of Forest Stands Using Airborne LiDAR. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2023. No 3 (59). Pp. 24–41.] DOI: 10.25686/2306-2827.2023.3.24; EDN: ATXTSY
10. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 / Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, С. А. Меньшиков и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 5. С. 154–166. [Kurbanov E. A., Vorobiev O. N., Menshikov S. A. et al. Identification of forest stands and dominant tree species in Penza Region using Sentinel-2 imagery. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2018. Vol. 15. Iss. 5. Pp. 154–166.] DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166; EDN: YOOOXJ
11. Пространственная динамика фитомассы березняков на бывших сельскохозяйственных землях Марийского Заволжья / Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, Л. С. Устюгова и др. // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2010. № 3. С. 8–14. [Kurbanov E. A., Vorobiev O. N., Ustyugova L. S. et al. Spatial Dynamics of Birch Forests Phytomass on Abandoned Agricultural Lands of Mari Transvolga Region. *Russian Forestry Journal*. 2010. No 3. Pp. 8–14.] EDN: MUROND

12. The Influence of Data Density and Integration on Forest Canopy Cover Mapping Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series in Mediterranean Oak Forests / V. Nasiri, S. M. M. Sadeghi, F. Moradi et al. // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2022. Vol. 11. Iss. 8. Art. 423. DOI: 10.3390/ijgi11080423
13. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index / L. Korhonen, Hadi, P. Packalen et al. // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 195. Pp. 259–274. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.021
14. Landsat-8 and Sentinel-2 burned area mapping – A combined sensor multi-temporal change detection approach / D. P. Roy, H. Huang, L. Boschetti et al. // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 231. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111254
15. Nandy S., Srinet R., Padalia H. Mapping forest height and aboveground biomass by integrating ICESat-2, Sentinel-1 and Sentinel-2 data using Random forest algorithm in northwest Himalayan foothills of India // Geophysical Research Letters. 2021. Vol. 48. Iss. 14. Art. e93799. DOI: 10.1029/2021GL093799
16. Оценка разносезонных изображений Sentinel-2 для классификации лесного покрова водохранимых зон рек Марийского Заволжья / Л. В. Тарасова, Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 2 (58). С. 77–92. [Tarasova L. V., Kurbanov E. A., Vorobiev O. N. et al. Assessment of Multi-Season Sentinel-2 Images for Classification of Forest Cover in Riparian Zones of Mari Zavolzhye. Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2023. No 2 (58). Pp. 77–92.] DOI: 10.25686/2306-2827.2023.2.77; EDN: OUDRPC
17. Forest aboveground biomass estimation using machine learning regression algorithm in Yok Don National Park, Vietnam / A. T. N. Dang, S. Nandy, R. Srinet et al. // Ecological Informatics. 2019. Vol. 50. Pp. 24–32. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2018.12.010
18. The use of machine learning methods to estimate aboveground biomass of grasslands: A review / T. G. Morais, R. F. Teixeira, M. Figueiredo et al. // Ecological Indicators. 2021. Vol. 130. Art. 108081. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108081
19. A survey on the use of GIS and remote sensing for sustainable forestry and ecology in Russia and China / E. Kurbanov, O. Vorobiev, J. Sha et al. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 9–20. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-9-20; EDN: KVLRRZ
20. Evaluation of alternative approaches for landscape-scale biomass estimation in a mixed-species northern forest / C. M. Hoover, M. J. Ducey, R. A. Colter et al. // Forest Ecology and Management. 2018. Vol. 409. Pp. 552–563. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.11.040
21. Forest aboveground biomass estimation using Landsat 8 and Sentinel-1A data with machine learning algorithms / Y. Li, M. Li, C. Li et al. // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. Art. 9952. DOI: 10.1038/s41598-020-67024-3
22. Machine learning-based estimates of above-ground biomass of subalpine forests using Landsat 8 OLI and Sentinel-2B images in the Jiuzhaigou National Nature Reserve, Eastern Tibet Plateau / K. Luo, Y. Wei, J. Du et al. // Journal of Forestry Research. 2022. Vol. 33. Iss. 4. Pp. 1329–1340. DOI: 10.1007/s11676-021-01421-w
23. Machine learning and geostatistical approaches for estimating aboveground biomass in Chinese subtropical forests / H. Su, W. Shen, J. Wang et al. // Forest Ecosystems. 2020. Vol. 7. Art. 64. DOI: 10.1186/s40663-020-00276-7
24. Общесоюзные нормативы для таксации лесов / В. В. Загребев, В. И. Сухих, А. З. Швиденко и др. М: Колос, 1992. 495 с. [Zagreev V. V., Sukhikh V. I., Shvidenko A. Z. et al. All-Union standards for forest inventory. Moscow: Kolos, 1992. 495 p.]
25. Замолодчиков Д. Г., Уткин А. И., Честных О. В. Коэффициенты конверсии запасов насаждений в фитомассу для основных лесобразующих пород России // Лесная таксация и лесоустройство. 2003. № 1 (32). С. 119–127. [Zamolodchikov D. G., Utkin A. I., Chestnykh O. V. Conversion Rates of Planting Stocks into the Phytomass of the Main Forest-Forming Species of Russia. Forest Inventory and Forest Planning. 2003. No 1 (32). Pp. 119–127.] EDN: YYIDOX
26. Курбанов Э. А. Бюджет углерода сосновых экосистем Волго-Вятского района: монография. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2002. 300 с. [Kurbanov E. A. Carbon budget of pine ecosystems in the Volga-Vyatka region. Monograph. Yoshkar-Ola: MarGTU Publ., 2002. 300 p.] EDN: RTPWCT
27. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45. Iss. 1. Pp. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324
28. Liess M., Schmidt J., Glaser B. Improving the Spatial Prediction of Soil Organic Carbon Stocks in a Complex Tropical Mountain Landscape by Methodological Specifications in Machine Learning Approaches // PLOS ONE. 2016. Vol. 11. Iss. 4. Art. e0153673. DOI: 10.1371/journal.pone.0153673
29. Belgiu M., Dragut L. Random Forest in Remote Sensing: A Review of Applications and Future Directions // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 114. Pp. 24–31. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011
30. Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms / L. Torretojal, A. Bastarrika, A. Boyano et al. // Journal of Computational Science. 2022. Vol. 58. Art. 101517. DOI: 10.1016/j.jocs.2021.101517
31. Evaluation of ALOS/PALSAR L-band data for the estimation of Eucalyptus plantations above-

ground biomass in Brazil / N. Baghdadi, G. Le Maire, J.-S. Bailly et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. Vol. 8. Iss. 8. Pp. 3802–3811. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2353661

32. Non-Parametric Retrieval of Aboveground Biomass in Siberian Boreal Forests with ALOS PALSAR Interferometric Coherence and Backscatter Intensity / M. A. Stelmaszczyk-Górska, P. Rodriguez-Veiga, N. Ackermann et al. // Journal of Imaging. 2016. Vol. 2. Iss. 1. Art. 1. DOI: 10.3390/jimaging2010001

33. Five Guiding Principles to Make Jupyter Notebooks Fit for Earth Observation Data Education / J. Wagemann, F. Fierli, S. Mantovani et al. // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. Iss. 14. Art. 3359. DOI: 10.3390/rs14143359

34. Probst P., Boulesteix A.-L. To tune or not to tune the number of trees in random forest // The Journal of Machine Learning Research. 2018. Vol. 18. Art. 181. DOI: 10.48550/arXiv.1705.05654

35. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS / Rousel J., Haas R., Schell J. et al. // Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations. Section A. NASA SP-351. NASA: Washington, DC, USA, 1974. Pp. 309–317.

36. Huete A., Justice C., Van Leeuwen W. MODIS Vegetation index (MOD 13) // EOS MODIS Algorithm-Theoretical Basis Document. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771, USA, 1999. Version 3. 115 p. URL: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf (дата обращения: 15.12.2023).

37. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. 1988. Vol. 25. Iss. 3. Pp. 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X

38. Gao B. C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 58. Iss. 3. Pp. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3

39. Baret F., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment // Remote Sensing of Environment. 1991. Vol. 35. Iss. 2–3. Pp. 161–173. DOI: 10.1016/0034-4257(91)90009-U

40. Assessment of red-edge vegetation indices for crop leaf area index estimation / T. Dong, J. Liu, J. Shang et al. // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 222. Pp. 133–143. DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.032

41. Gitelson A. A., Gritz Y., Merzlyak M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // Journal of Plant Physiology. 2003. Vol. 160. Iss. 3. Pp. 271–282. DOI: 10.1078/0176-1617-00887

42. Fushiki T. Estimation of prediction error by using K-fold cross-validation // Statistics and Computing. 2011. Vol. 21. Iss. 2. Pp. 137–146. DOI: 10.1007/s11222-009-9153-8

43. Liaw A., Wiener M. Classification and regression by Random Forest // R News. 2002. Vol. 2. Iss. 3. Pp. 18–22.

44. Review of machine learning approaches for biomass and soil moisture retrievals from remote sensing data / I. Ali, F. Greifeneder, J. Stamenkovic et al. // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. Iss. 12. Pp. 16398–16421. DOI: 10.3390/rs71215841

45. Tesfaye A. A., Awoke G. B. Evaluation of the saturation property of vegetation indices derived from sentinel-2 in mixed crop-forest ecosystem // Spatial Information Research. 2021. Vol. 29. Iss. 1. Pp. 109–121. DOI: 10.1007/s41324-020-00339-5

Статья поступила в редакцию 20.12.2023; одобрена после рецензирования 10.01.2024; принята к публикации 04.03.2024

Информация об авторах

ДЕРГУНОВ Денис Михайлович – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС. Автор 15 научных публикаций. SPIN-код: 1356-4021

ВОРОБЬЁВ Олег Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС, депонирование углерода лесными экосистемами и их мониторинг. Автор 86 научных и учебно-методических публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4897-677X>; SPIN-код: 2870-0763

КУРБАНОВ Эльдар Аликрамович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, руководитель международного центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – устойчивое управление лесами, ДЗ лесов и ГИС, биологическая продуктивность и депонирование углерода лесными экосистемами. Автор 180 научных и учебно-методических публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5330-9990>; SPIN-код: 9202-6359

ЛЕЖНИН Сергей Анатольевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 67 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6319-4752>; SPIN-код: 3433-2617

ГУБАЕВ Александр Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник сектора научных программ и грантов, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 30 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9410-9178>; SPIN-код: 8458-2979

Вклад авторов:

Дергунов Д. М. – концепция, методика, валидация, полевые данные, подготовка статьи, визуализация.

Воробьев О. Н. – методика, валидация, формальный анализ, проверка данных, редактирование.

Курбанов Э. А. – концепция, методика, проверка данных, подготовка статьи, руководство, финансирование.

Лежнин С. А. – программное обеспечение, формальный анализ, редактирование.

Губаев А. В. – программное обеспечение, визуализация.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*58

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.30>

EDN: JHUADY

Estimation of the Random Forest Machine Learning Algorithm for Classification of Forest Phytomass

D. M. Dergunov, O. N. Vorobev, E. A. Kurbanov[✉], S. A. Lezhnin, A. V. Gubaev

Volga State University of Technology,
3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation
kurbanovea@volgatech.net[✉]

ABSTRACT

Introduction. Forests play a critical role in mitigating climate change, protecting biodiversity and providing ecosystem services such as clean air and water. Assessing and monitoring above-ground forest phytomass is important for understanding the carbon balance and changes in forest condition and productivity over time. The **purpose** of the study is to evaluate the Random Forest machine learning algorithm for classifying the spatial distribution of above-ground phytomass based on Sentinel-2 satellite image data using the case of the Sosnovoborsky nature reserve in the Penza region. **Objects and methods.** The object of the study is the forest stands of the Sosnovoborsky nature reserve. According to forest management and field data, 110 test plots were established in the study area. To model the spatial distribution of phytomass over the study area, the ensemble machine learning method Random Forest was used. The input data for the model were 12 spectral bands and 7 vegetation indices. To select the values of the optimal parameters of the Random Forest model, the GridSearchCV program was employed. Modeling of the distribution of the phytomass of a forest stand using the Random Forest algorithm was carried out using the interactive open-source web environment Jupyter Notebook. **Results.** Using the selected parameters of the Random Forest algorithm, an optimal model ($R^2=0.60$) of phytomass distribution throughout the reserve was built. The density of the residuals of the predicted values around zero and their closeness to the normal distribution indicate the adequacy of the model. The maximum connection with forest phytomass was demonstrated by 11 (SWIR), b5, b3, b12, b2 and b7 spectral bands of the Sentinel-2 image. As a result, a map of the spatial distribution of the forest phytomass across the study area was obtained. **Conclusions.** The results show that the combination of Sentinel-2 spectral bands and vegetation indices improves the accuracy of estimating the phytomass of forest stands using the Random Forest machine learning algorithm. The developed algorithm can be recommended for determining the spatial distribution of the above-ground phytomass in the forest ecosystems of the Penza region.

Keywords: satellite imagery; Sentinel-2; vegetation indexes; forest ecosystems; remote sensing; Penza region

Funding: the work was carried out within the framework of a grant from the Russian Science Foundation № 22-16-00094 “Remote monitoring of forest ecosystems in a changing climate”, <https://rscf.ru/project/22-16-00094/>.

The article was submitted 20.12.2023; approved after reviewing 10.01.2024;
accepted for publication 04.03.2024

For citation: Dergunov D. M., Vorobev O. N., Kurbanov E. A., Lezhnin S. A., Gubaev A. V. Estimation of the Random Forest Machine Learning Algorithm for Classification of Forest Phytomass. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024. № 1 (61). Pp. 30–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.30>; EDN: JHUADY

Information about the authors

Denis M. Dergunov – Postgraduate student, Chair of Silviculture and Forest Inventory, Volga State University of Technology. Research interests – forest remote sensing and GIS. Author of 15 scientific publications. SPIN: 1356-4021

Oleg N. Vorobev – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Chair of Silviculture and Forest Inventory, Volga State University of Technology. Research interests – forest remote sensing and GIS, carbon sequestration by forest ecosystems, forest eco-system monitoring. Author of 86 scientific publications and textbooks. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4897-677X>; SPIN: 2870-0763

Eldar A. Kurbanov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Chair of Silviculture and Forest Inventory; Head of the International Center for Sustainable Forest Management and Remote Sensing, Volga State University of Technology. Research interests – sustainable forest management, forest remote sensing and GIS, biological productivity of forest ecosystems, carbon sequestration by forest ecosystems. Author of 180 scientific publications and textbooks. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5330-9990>; SPIN: 9202-6359

Sergey A. Lezhnin – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Chair of Silviculture and Forest Inventory, Volga State University of Technology. Research interests – remote sensing of the Earth, biological productivity of forest ecosystems. Author of 67 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6319-4752>; SPIN: 3433-2617

Alexandr V. Gubaev – Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Division of Scientific Programs and Grants, Volga State University of Technology. Research interests – remote sensing of the Earth, biological productivity of forest ecosystems. Author of 30 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9410-9178>; SPIN: 8458-2979

Contribution of the authors:

Dergunov D. M. – conceptualization, methodology, validation, field data, manuscript preparation, visualization.

Vorobev O. N. – methodology, validation, formal analysis, data verification, reviewing and editing.

Kurbanov E. A. – conceptualization, methodology, data verification, manuscript preparation, supervision, funding.

Lezhnin S. A. – software, formal analysis, reviewing and editing.

Gubaev A. V. – software, visualization.

The authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 630*52:630*174.754

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.44>

EDN: BRQGYX

Моделирование доли коры в фитомассе ветвей сосны обыкновенной в степной зоне

Н. И. Плюха¹, В. А. Усольцев^{1,2✉}, И. С. Цепордей²

¹ Уральский государственный лесотехнический университет,
Российская Федерация, 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

² Ботанический сад УрО РАН,
Российская Федерация, 620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202а
Usoltsev50@mail.ru ✉

Введение. Количество стволовой древесины надлежащего качества для промышленности постоянно сокращается, и возникает необходимость эффективного использования ветвей деревьев в производстве технологической щепы, целлюлозы, плитных материалов. Поскольку базисная плотность коры ветвей существенно меньше, чем в древесине, доля коры в массе ветвей влияет на качество продукции, изготавливаемой из ветвей деревьев. С другой стороны, кора деревьев, наряду с защитными функциями, выполняет важные физиологические функции, связанные, в частности, с влагопроводимостью внутренней части коры и влагоёмкостью её внешней части, и в последнее время интерес к этим экофизиологическим процессам в древесном пологе непрерывно растёт. **Цель исследования.** В настоящем исследовании предпринята первая попытка разработки моделей процентного содержания коры в массе ветвей сосны обыкновенной и сравнительного анализа содержания коры в массе ветвей естественных сосняков и культур. **Объекты и методы.** Объектом исследования послужили чистые сосняки естественного и искусственного происхождения островных боров в степной зоне Тургайского прогиба. Всего в анализе использовано 482 модельных дерева, взятых на 48 пробных площадях. **Результаты.** Анализ зависимости доли коры в массе ветвей от возраста и диаметра ствола на высоте 1,3 м показал, что названные переменные объясняют в естественных сосняках и культурах соответственно 71 и 91 % её изменчивости. Установлено различное соотношение доли коры в естественных сосняках и культурах в связи как с возрастом деревьев, так и с диаметром ствола. **Вывод.** Разработанные регрессионные модели зависимости доли коры в массе ветвей от дендрометрических показателей деревьев в естественных сосняках и культурах показали наличие разного её соотношения в зависимости от происхождения древостоев и в связи с дендрометрическими показателями деревьев.

Ключевые слова: естественные сосняки; культуры; регрессионные модели

Финансирование: работа выполнена согласно государственному заданию Ботанического сада УрО РАН.

Введение. Количество стволовой древесины надлежащего качества для промышленности постоянно сокращается, и возникает необходимость эффективного использования ветвей деревьев в производстве технологической щепы, целлюлозы, плитных материалов [1]. Поскольку базис-

ная плотность коры ветвей на 40–80 % меньше плотности их древесины [1], доля коры в массе ветвей влияет на качество продукции, изготавливаемой из ветвей деревьев. В производстве древесно-стружечных и древесно-волоконистых плит из ветвей деревьев доля коры в нашей стране была

© Плюха Н. И., Усольцев В. А., Цепордей И. С., 2024

Для цитирования: Плюха Н. И., Усольцев В. А., Цепордей И. С. Моделирование доли коры в фитомассе ветвей сосны обыкновенной в степной зоне // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 1 (61). С. 44–54. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.44>; EDN: BRQGYX

лимитирована техническими условиями на уровне 12–20 %, а фактическая доля коры в такой щепе, полученной из ветвей, превышала допустимые значения и составляла 21–24 %, что ограничивало использование ветвей в производстве древесно-стружечных и древесно-волоконистых плит [2].

Однако современные технологии дают возможность производства древесно-стружечных плит из ветвей любых древесных пород без потери качества продукции [3], но с повышенными технологическими затратами [4]. Нужно отметить, что в технологии производства лигноуглеводных древесных пластиков (без добавления связующих смол), разрабатываемой в 1970–80-е годы в Уральском лесотехническом институте, увеличение доли коры в сырье не только не ухудшало, а, напротив, повышало их качество [5, 6], по-видимому, вследствие наличия в коре дубильных веществ, выступающих в качестве клеев для древесных плит [7].

Кора деревьев, наряду с защитными функциями, выполняет в рамках «функциональной экологии коры» [8] важные физиологические функции, связанные, в частности, с влагопроводимостью внутренней части коры и влагоёмкостью её внешней части [9, 10], и в последнее время интерес к этим экогидрологическим процессам в древесном пологе непрерывно растёт [9, 11, 12]. Многофункциональная роль коры, значительное количество содержащегося в ней углерода [13] и высокое морфологическое разнообразие позволяют предположить, что изменчивость морфологии коры может быть важным компонентом изменчивости экологических стратегий растений. Однако роль коры в этих стратегиях остаётся неясной, учитывая пока ещё слабое понимание закономерностей и причин её изменчивости [8].

Вследствие большего наличия элементов питания в коре по сравнению с древесиной [14, 15], в ветвях с их повышенной долей коры содержится больше

элементов питания, чем в стволах. У вишней птичьей (*Prunus avium* L.) с увеличением диаметра ствола доля коры в массе ветвей снижается вследствие увеличения средней площади сечения ветвей. В то же время наблюдается баланс между образованием новых ветвей с низким диаметром и высокой долей коры и утолщением более крупных ветвей с относительно меньшей долей коры [14].

По мере роста древостоя после смыкания полога непрерывно изменяются его морфоструктура и квалитетические характеристики ветвей, в том числе соотношение коры и древесины в ветвях, содержание сухого вещества, базисная плотность и др. Исследованию названных показателей было посвящено специальное исследование в 20-летних естественном сосняке и культуре [16]. Установлено, что доля коры в ветвях возрастает в направлениях от центра к периферии кроны в естественном сосняке и культуре соответственно с 36 до 53 и с 33 до 47 % и по вертикальному профилю кроны – снизу вверх, соответственно с 36 до 65 и с 33 до 54 %. Регрессионные модели для естественного сосняка и для культуры характеризовались коэффициентами детерминации соответственно 0,629 и 0,850.

По данным 525 и 325 модельных деревьев, полученных соответственно на 45 и 32 пробных площадях в березняках и осинниках лесостепной зоны Северного Казахстана, разработаны регрессионные модели для фракций фитомассы деревьев ($R^2 = 0,97–0,98$) и соответствующие таблицы их изменения в связи с возрастом, диаметром ствола и высотой дерева [17, 18]. Согласно составленным таблицам, доля коры в массе ветвей деревьев одного и того же диаметра ствола не зависит от условий местопроизрастания и с возрастом закономерно снижается, поскольку у деревьев старшего возраста при более выраженной ажурности кроны преобладают толстые ветви, содержащие меньший процент коры. При одном

и том же возрасте доля коры с увеличением диаметра ствола снижается также вследствие большего участия толстых ветвей в общей их массе (рис. 1).

В ельниках Чешской Республики в возрасте от 82 до 107 лет, при среднем диаметре стволов от 38 до 30 см и средней высоте от 20 до 33 м доля коры в массе ветвей в абсолютно сухом состоянии колеблется в диапазоне от 17 до 24 % при среднем коэффициенте изменчивости 43 % [1]. Для четырёх древесных пород штата Алабама в США выведены уравнения зависимости массы древесины ветвей и коры ветвей от диаметра ствола и высоты дерева с коэффициентами детерминации соответственно 0,87 и 0,89 [19], для трёх пород штата Юта с коэффициентами детерминации 0,97 и 0,91 [20] и для двух пород в Канаде с коэффициентами детерминации 0,94 и 0,95 [21]. В 17-летних культурах дуба летнего (*Quercus longipes* Stev.) в Болгарии доля коры в ветвях дерева при диаметре ствола от 4 до 17 см варьирует в диапазоне от 17 до 31 % [22]. В 49-летних древостоях робинии (*Robinia pseudoacacia* L.) в Словакии у деревьев с диаметром ствола от 22 до 40 см доля коры в ветвях колеблется в диапазоне от 11 до 25 % [23]. В сосняках чернично-зеленомошных Архангельской области в возрасте деревьев 55 и 90 лет доля коры в ветвях составляет соответственно 32 и 29 % [24]. В сосняках брусничных

на юге Карелии при увеличении возраста дерева от 22 до 185 лет доля коры в ветвях снижается с 38 до 21 % [25].

У 11 древесных пород Индии в штате Керала доля коры в массе ветвей варьирует в пределах от 10 до 29 % и снижается по мере увеличения диаметра ветвей [26]. В берёзовых древостоях Западно-Сибирской лесостепи на 24 пробных площадях в возрасте древостоев от 11 до 86 лет по данным 325 деревьев получены аналогичные закономерности при $R^2 = 0,812$, согласно которым доля коры в ветвях по мере увеличения их диаметра с 0,4 до 11 см снижается: в свежесрубленном состоянии с 55 до 22 % и в абсолютно сухом – с 50 до 23 % [27]. В тех же условиях для осиновых древостоев закономерности (при $R^2 = 0,974$) были аналогичны, но доля коры в ветвях осины оказалась больше по отношению к берёзе на 15 % у тонких ветвей и на 10 % у толстых [27, 28].

В литературе также приводятся показатели доли коры в массе ветвей, подразделённых на крупную и мелкую фракции [29], иногда с выделением фракции годичных побегов [30]. Однако в большинстве литературных источников масса ветвей на древесину и кору не разделены, и доля коры в них неизвестна [31–33]. Не показана доля коры в ветвях и в современных мировых базах данных о фитомассе деревьев и древостоев [34–36].

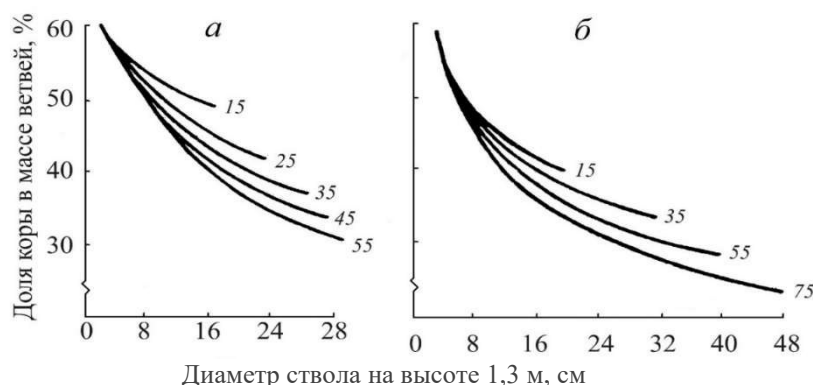


Рис. 1. Изменение доли коры в массе ветвей в абсолютно сухом состоянии в зависимости от диаметра ствола и возраста деревьев (показан цифрами) осины (а) и берёзы (б) [18]
Fig. 1. Variation in the bark share in the mass of branches in absolute dry condition depending on the stem diameter and the tree age (indicated with numbers) of aspen (a) and birch (b) [18]

Целью настоящего исследования было:

- разработать модели процентного содержания коры в массе ветвей сосны;
- выполнить сравнительный анализ содержания коры в массе ветвей естественных сосняков и культур.

Объекты и методика исследования.

Объектом исследования послужили чистые сосняки естественного и искусственного происхождения островных боров в степной зоне Тургайского прогиба (52°20' с. ш., 64°00' в. д) [37]. Полученные в этих сосняках материалы о качественных показателях фитомассы деревьев опубликованы ранее в базе данных для лесов Центральной Евразии [38]. Поскольку в упомянутой базе данных масса ветвей представлена без разделения на древесину и кору, для реализации поставленной цели по нашим первичным полевым материалам дополнительно рассчитана масса коры и определена для каждого дерева доля коры в массе ветвей в абсолютно сухом состоянии. Всего в анализе использованы данные 482 модельных деревьев, взятых

на 48 пробных площадях. Методика выборочного учёта массы различных фракций изложена ранее [18]. Статистики выборок анализируемых показателей модельных деревьев показаны в таблице. В статистическом анализе экспериментальных данных для получения надёжного значения средней величины требуется минимальная дисперсия при данном числе наблюдений. В регрессионном анализе ситуация прямо противоположная: чем больше общая дисперсия признака при одной и той же остаточной дисперсии, тем надёжнее результат регрессионного анализа. Данные таблицы свидетельствуют о высокой разнице максимальных и минимальных значений, а следовательно, и о высокой общей дисперсии, что создаёт предпосылку для построения надёжной регрессионной модели, объясняющей общую изменчивость признака [39]. Обработка экспериментального материала выполнена по программе многофакторного регрессионного анализа Statgraphics-19 (<http://www.statgraphics.com/>).

Результаты статистической обработки исходных данных

Results of the statistical analysis of experimental data

Анализируемые показатели	Статистики анализируемых показателей				
	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Стандартное отклонение	Число наблюдений
Естественные сосняки					
Возраст дерева, лет	49	13	110	29,5	265
Диаметр ствола на высоте 1,3 м, см	10,0	0,3	47,8	8,75	265
Доля коры в массе ветвей дерева, %	48,2	17,8	100,0	19,6	265
Культуры					
Возраст дерева, лет	20	9	50	8,0	217
Диаметр ствола на высоте 1,3 м, см	6,8	0,3	21,7	4,12	217
Доля коры в массе ветвей дерева, %	54,7	28,9	100,0	14,2	217

Результаты и их обсуждение. В результате регрессионного анализа получены модели:

– для естественных сосняков:

$$\ln(\text{Pro}) = 5,6381 - 0,7327(\ln A) + 0,1046(\ln A)^2 - 0,0778(\ln A)(\ln D); \quad (1)$$

$$\text{adj}R^2 = 0,708; \text{SE} = 0,21,$$

– для культур:

$$\ln(\text{Pro}) = 3,3678 + 0,6532(\ln A) - 0,0827(\ln A)^2 - 0,1143(\ln A)(\ln D); \quad (2)$$

$$\text{adj}R^2 = 0,912; \text{SE} = 0,08,$$

где Pro – доля коры в массе ветвей дерева в абсолютно сухом состоянии, %; A – возраст дерева, лет; D – диаметр ствола на высоте 1,3 м, см. Свободный член моделей (1) и (2) скорректирован на логарифмическое преобразование [40]. Все регрессионные коэффициенты значимы на уровне $p < 0,01$. По соотношению фактических и расчётных значений доли коры (рис. 2) можно судить о наличии равномерности остаточной дисперсии и отсутствии корреляции остатков.

Согласно данным таблицы, среднее значение доли коры в массе ветвей в культурах существенно больше, чем в естественных древостоях и составляет соответственно 55 и 48 %. Но согласно моделям (1) и (2) это соотношение изменяется в связи с возрастом дерева и диаметром ствола. В частности, при диаметре ствола, равном 4 см, доля коры в культурах больше, чем в естественных древосто-

ях, в возрастах 20 и 50 лет соответственно на 2,9 и 4,7 %, но при диаметре ствола, равном 10 см, соотношение меняется на противоположное, и доля коры в культурах меньше, чем в естественных древостоях, в возрастах 20 и 50 лет соответственно на 2,4 и 1,7 %.

Как следовало из рис. 1, доля коры в массе ветвей как берёзы, так и осины, не зависела от возраста при малых значениях диаметра ствола, но по мере увеличения диаметра ствола влияние возраста на долю коры проявлялось во всё большей степени, т. е. имело место совместное влияние возраста и диаметра ствола на долю коры в массе ветвей, выражаемое комбинированной переменной в виде произведения двух независимых переменных [41].

Комбинированная переменная $(\ln A)(\ln D)$, включённая в модели (1) и (2), показала наличие знака минус в обоих случаях. Но в отношении двух других переменных ситуация иная: в естественных сосняках имеется знак минус при $(\ln A)$ и знак плюс при $(\ln A)^2$, а в культурах – наоборот, соответственно знаки плюс и минус. Различие естественных древостоев и культур в отношении возрастных изменений доли коры при фиксированном диаметре ствола видно на графической интерпретации моделей (1) и (2) (рис. 3), и связано оно с различиями тех и других по возрастной динамике естественного изреживания.

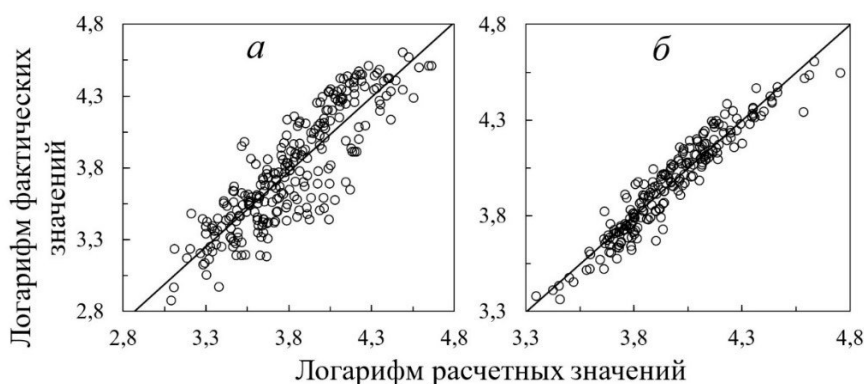


Рис. 2. Соотношение фактических и расчётных по моделям (1) и (2) значений доли коры в массе ветвей естественных сосняков (а) и культур (б)

Fig. 2. The ratio of the empirical and theoretical values of the bark share in the mass of branches in natural pine forests (a) and plantations (b) according to models (1) and (2)

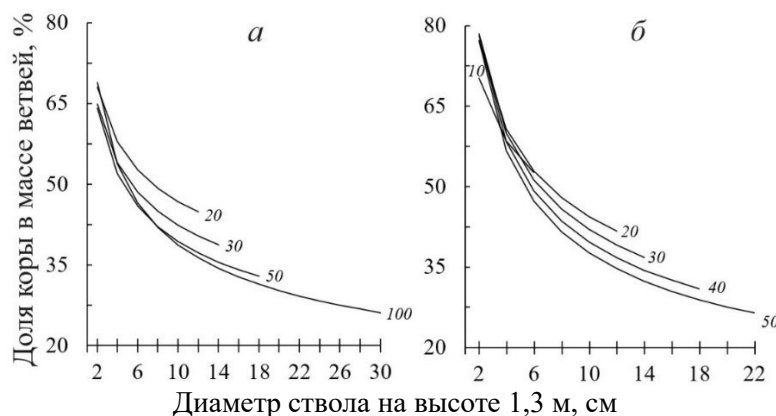


Рис. 3. Изменение доли коры в массе ветвей в абсолютно сухом состоянии в зависимости от диаметра ствола и возраста деревьев (показан цифрами) в естественных древостоях (а) и культурах (б) согласно моделям (1) и (2)

Fig. 3. Variation in the bark share in the mass of branches in absolute dry condition depending on the stem diameter and the tree age (indicated with numbers) in natural stands (a) and plantations (b) according to models (1) and (2)

Густота естественного самосева в условиях сухой степи достигает в первые годы роста 300 и более тыс. на 1 га [18], и интенсивное изреживание естественных сосняков идёт с первых лет, постепенно затухая. В культурах в тех же условиях при густоте посадки от 2 до 4 тыс. на 1 га в первые годы жизни деревья растут свободно, и лишь примерно к 15 годам происходит смыкание крон и начинается естественное изреживание. При наступлении естественного изреживания и конкурентных отношений деревьев в культурах средняя толщина ветвей в кроне снижается по сравнению с их толщиной при свободном росте в первые годы, а с возрастом темпы естественного изреживания, как и в естественных древостоях, снижаются. Соответственно, в естественных древостоях идёт монотонное увеличение средней толщины ветвей и соответствующее

снижение доли коры в них. В культурах происходит снижение толщины ветвей до возраста смыкания крон с последующим возрастным её увеличением и, соответственно, вначале доля коры в ветвях увеличивается, достигает пика и затем монотонно снижается (рис. 3).

Выводы

1. На основе авторской базы экспериментальных данных в количестве 482 модельных деревьев, взятых на 48 пробных площадях, впервые разработаны регрессионные модели зависимости доли коры в массе ветвей от дендрометрических показателей деревьев в естественных сосняках и культурах островных боров Тургайского прогиба.

2. Установлено различное соотношение доли коры в естественных сосняках и культурах в связи как с возрастом деревьев, так и с диаметром ствола.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Basic density of spruce wood, wood with bark, and bark of branches in locations in the Czech Republic / V. Gryc, P. Horáček, J. Šlezingerová et al. // Wood Research. 2011. Vol. 56. Iss. 1. Pp. 23–32. URL: <http://www.woodresearch.sk/wr/201101/03.pdf> (дата обращения: 05.12.2023).

2. Крона дерева: промышленное и рекреационное использование / А. В. Грищенко, В. А. Кучерявый, Р. И. Томчук и др. Львов: Вища школа, 1985. 168 с.

3. Functional Assessment of Particleboards Made of Apple and Plum Orchard Pruning / G. Kowaluk, K. Szymanowski, P. Kozłowski et al. // Waste and Biomass Valorization. 2020. Vol. 11. Iss. 6. Pp. 2877–2886. DOI: 10.1007/s12649-018-00568-8

4. Utilization of woody pruning residues of apple trees / N. Gilanipoor, R. Spinelli, R. Naghdi et al. // Forest Science and Technology. 2020. Vol. 16. Iss. 4. Pp. 216–223. DOI: 10.1080/21580103.2020.1845822

5. Usolzew W.A. Birkenäste als Rohstoff für die Herstellung von Holzspanplatten // Bauinformation (Berlin). 1971. Vol. 9. P. 140.
6. Дружинин А. В., Лазарева А. Д. Пластики из смеси луба и бересты коры березы без добавления связующих веществ // Древесные плиты и пластики: межвузовский сборник научных трудов. Вып. 2. Свердловск: Уральский лесотехнический институт, 1975. С. 141–145.
7. Ogunwusi A. A. Potentials of Industrial Utilization of Bark // Journal of Natural Sciences Research. 2013. Vol. 3. Iss. 5. Pp. 106–115.
8. Bark functional ecology: evidence for tradeoffs, functional coordination, and environment producing bark diversity / J. A. Rosell, S. Gleason, R. Mendez-Alonso et al. // New Phytologist. 2014. Vol. 201. Iss. 2. Pp. 486–497. DOI: 10.1111/nph.12541
9. Vertical Variability in Bark Hydrology for Two Coniferous Tree Species / A. Ilek, J. T. Van Stan, K. Morkisz et al. // Frontiers in Forests and Global Change. 2021. Vol. 4. Art. 687907. DOI: 10.3389/ffgc.2021.687907
10. Ilek A., Siegert C. M., Wade A. Hygroscopic contributions to bark water storage and controls exerted by internal bark structure over water vapor absorption // Trees. 2021. Vol. 35. Iss. 3. Pp. 831–843. DOI: 10.1007/s00468-021-02084-0
11. Aubrey D. P. Relevance of Precipitation Partitioning to the Tree Water and Nutrient Balance // Precipitation partitioning by vegetation: A global synthesis / J. T. Van Stan II, E. Gutmann, J. Friesen (eds.). Switzerland: Springer, 2020. Pp. 147–162. DOI: 10.1007/978-3-030-29702-2_10
12. Foliar water uptake of fog confers ecophysiological benefits to four common tree species of southeastern freshwater forested wetlands / M. J. Carmichael, J. C. White, S. T. Cory et al. // Ecohydrology. 2020. Vol. 13. Iss. 7. Art. e2240. DOI: 10.1002/eco.2240
13. National-Scale Biomass Estimators for United States Tree Species / J. C. Jenkins, D. C. Chojnacky, L. S. Heath et al. // Forest Science. 2003. Vol. 49. Iss. 1. Pp. 12–35. DOI: 10.1093/FORESTSCIENCE/49.1.12
14. Above-ground woody biomass allocation and within tree carbon and nutrient distribution of wild cherry (*Prunus avium* L.) – a case study / C. Morhart, J. P. Sheppard, J. K. Schuler et al. // Forest Ecosystems. 2016. Vol. 3. Iss. 2. Art. 4. DOI: 10.1186/s40663-016-0063-x
15. Jones J. M., Heineman K. D., Dalling J. W. Soil and species effects on bark nutrient storage in a premontane tropical forest // Plant and Soil. 2019. Vol. 438. Iss. 1–2. Pp. 347–360. DOI: 10.1007/s11104-019-04026-9
16. Усольцев В. А. Квалиметрия ветвей в сосняках Аман-Карагайского бора // Вестник сельскохозяйственной науки Казахстана. 1985. № 7. С. 74–78. EDN: SPUQAP
17. Усольцев В. А. Таблицы для подеревного учёта надземной фитомассы березы и осины Северного Казахстана // Рациональное использование и повышение устойчивости лесов Казахстана. Щучинск, 1983. С. 143–164 (Рукопись депонирована в КазНИИТИ 7 июля 1983 г., № 478 Ка-Д 83. Реферат опубликован в Библиографическом указателе ВИНТИ «Депонированные научные работы». М., 1983. № 12 (146). С. 157–158). EDN: UCPOMV
18. Усольцев В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев: монография. Красноярск: Изд-во Красноярского государственного университета, 1985. 191 с. EDN: TFMPKD
19. Sirois D. L. Biomass of Four Hardwoods from Lower Piedmont Pine-Hardwood Stands in Alabama // General Technical Report SO-46. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1983. 18 p. DOI: 10.2737/SO-GTR-46
20. Zimmermann G. L. The Wood and Bark Biomass and Production of *Populus tremuloides*, *Abies lasiocarpa* and *Picea engelmannii* in Northern Utah. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in forest ecology. Utah State University, Logan, Utah, 1979. 84 p. DOI: 10.26076/5708-93ab
21. Ker M. F. Weight relationships for balsam fir and black spruce in Western Newfoundland // Information Report N-X-136. Newfoundland: Environment Canada, Forest Service, Newfoundland Forest Research Centre St. John's, 1975. 23 p. URL: <https://ostrnrcan.dostnrcan.canada.ca/handle/1845/239193> (дата обращения: 05.12.2023).
22. Броутилова М. Надземна фитомаса на млади култури от влажноизинен летен (вардимски) дъб (*Quercus longipes* Stev.) при два типа местораствения // Горскостопанска наука. 1983. Т. 20. № 6. С. 40–50 (болг.).
23. Benčat T. Black locust biomass production in Southern Slovakia. Bratislava: VEDA, 1989. 191 p.
24. Вакуров А. Д. Определение общей фитомассы в сосняках чернично-зеленомошных // Продуктивность органической и биологической массы леса. М.: Наука, 1974. С. 11–15.
25. Обмен веществ и энергии в сосновых лесах Европейского Севера / Н. И. Казимиров, А. Д. Волков, С. С. Зябченко и др. Л.: Наука, 1977. 304 с.
26. Bhat K. M., Bhat K. V., Dhamodaran T. K. Wood and bark properties of branches of selected tree species growing in Kerala // Research Report 29. Kerala Forest Research Institute, India, 1985. 34 p. URL: <https://docs.kfri.res.in/KFRI-RR/KFRI-RR029.pdf> (дата обращения: 05.12.2023).
27. Усольцев В. А. Березовые сучья – сырье для производства древесно-стружечных плит // Информатор ЛатНИИЛХП (обзоры текущих исследований института). Рига: ЛатНИИЛХП, 1971. С. 78–83.

28. Усольцев В. А. Тонкомерные сортименты березы и осины для производства древесностружечных плит // Плиты и фанера. Реферативная информация. 1975. № 10. С. 6–7.

29. Габеев В. Н. Биологическая продуктивность лесов Приобья. Новосибирск: Наука. 1976. 171 с.

30. Vyskot M. Biomass of the tree layer of a spruce forest in the Bohemian Uplands. Praha: Academia, 1981. 397 p.

31. Данилин И. М., Цогт З., Усольцев В. А. Надземная фитомасса деревьев лиственницы и березы в лесах Центральной Сибири и Восточного Хэнтэя // Эко-Потенциал. 2015. № 1 (9). С. 33–36. EDN: TMCZPB

32. Габделхаков А. К. Надземная фитомасса деревьев липы мелколистной в культурах и порослевых древостоях // Эко-Потенциал. 2015. № 3 (11). С. 7–13. EDN: UKKWZH

33. Compatible System for Predicting Total and Merchantable Stem Volume over and under Bark, Branch Volume and Whole-Tree Volume of Pine Species / J. J. Corral-Rivas, D. J. Vega-Nieva, R. Rodríguez-Soalleiro et al. // Forests. 2017. Vol. 8. Iss. 11. Art. 417. DOI: 10.3390/f8110417

34. Tallo: a global tree allometry and crown architecture database / T. Jucker, F. J. Fischer, J. Chave et al. // Global Change Biology. 2022. Vol. 28. Iss. 17. Pp. 5254–5268. DOI: 10.1111/gcb.16302

35. Усольцев В. А. Фитомасса модельных деревьев для дистанционной и наземной таксации лесов Евразии. Монография. 3-е дополненное электронное издание. Екатеринбург: Ботанический

сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451> (дата обращения: 05.12.2023).

36. Усольцев В. А. Биомасса и первичная продукция лесов Евразии. Монография. 4-е дополненное электронное издание. Екатеринбург: Ботанический сад УрО РАН, Уральский государственный лесотехнический университет, 2023. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (дата обращения: 05.12.2023).

37. Грибанов Л. Н., Лагов И. А., Чабан П. С. Леса Казахстана // Леса СССР. М.: Наука, 1970. Т. 5. С. 5–77.

38. Usoltsev V. A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia: CD-monograph. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649> (дата обращения: 05.12.2023).

39. Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ / пер. с англ. Ю. П. Адлер, В. Г. Горский. М.: Статистика, 1973. 392 с.

40. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass // Canadian Journal of Forest Research. 1972. Vol. 2. Iss. 1. Pp. 49–53. DOI: 10.1139/X72-009

41. Прогнозирование плодоношения древесных растений / А. М. Мауринь, И. Я. Либа, А. Я. Дрике и др. // Оптимизация использования и воспроизводства лесов СССР. М.: Наука, 1977. С. 50–53.

Статья поступила в редакцию 19.12.2023; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 25.03.2024

Информация об авторах

ПЛЮХА Николай Иванович – аспирант, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – лесоведение, лесная таксация. Автор восьми научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>; SPIN-код: 4682-7412

УСОЛЬЦЕВ Владимир Андреевич – доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, Ботанический сад УрО РАН; профессор кафедры лесной таксации и лесоустройства, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – лесоведение, лесная таксация, фитогеография. Автор 905 научных публикаций, в том числе 43 монографий. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>; SPIN-код: 3668-6843

ЦЕПОРДЕЙ Иван Степанович – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, Ботанический сад УрО РАН. Область научных интересов – лесоведение, лесная таксация, фитогеография. Автор 105 научных публикаций, в том числе пяти монографий. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>; SPIN-код: 3853-7684

Доступность данных и материалов: наборы данных, проанализированные в ходе исследования, являются общедоступными.

Вклад авторов:

Плюха Н.И. – выполнение экспериментальной работы, написание и подготовка статьи.

Усольцев В.А. – постановка цели и задач; разработка программы и методики.

Цепордей И.С. – разработка программы и методики; выполнение экспериментальной работы, написание и подготовка статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*52:630*174.754

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.44>

EDN: BRQGYX

Modeling the Share of the Bark in the Phytomass of Branches of Scots Pine in the Steppe Zone**N. I. Plyukha¹, V. A. Usoltsev^{1,2✉}, I. S. Tsepordey²**¹ Ural State Forest Engineering University,

37, Sibirskii Trakt, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation

² Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

202a, 8 Marta St., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

Usoltsev50@mail.ru✉

ABSTRACT

Introduction. The amount of stem wood of appropriate quality for industry is declining steadily, and there is a need for the effective use of tree branches in the production of technological chips, cellulose, and chipboards. Since the basic density of the branch bark is significantly lower than that of the branch wood, the share of the bark in the mass of branches affects the quality of products made from tree branches. On the other hand, the bark of trees, along with its protective functions, performs important physiological functions related, in particular, to the moisture conductivity of the inner part of the bark and the moisture capacity of its outer part, and recently there has been growing interest in these ecohydrological processes of the tree canopy. **The purpose of the study.** In this study, the first attempt was made to develop the models of the share of the bark in the phytomass of branches in natural pine forests and plantations. **Objects and methods.** The object of the study was pure pine forests of natural and artificial origin of the island forests in the steppe area of the Turgay Depression. The analysis involved a total of 482 model trees taken from 48 sample areas. **Results.** The analysis of the dependence of the bark share in the branch phytomass on the tree age and stem diameter at 1.3 m above ground (at breast height) revealed that these variables explain 71 and 91 % of its variability in natural pine forests and plantations, respectively. The variation in the percentage shares of the bark in natural pine forests and plantations was found to be associated with both the tree age and the stem diameter. **Conclusion.** The developed regression models of the relationship between the bark share in the branch phytomass and the dendrometric parameters of trees in natural pine forests and plantations showed differences in the share of the bark depending on the origin of stands and the dendrometric parameters of trees.

Keywords: natural pine forests; plantations; regression models**Funding:** the study was carried out under the state task of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.**REFERENCES**

1. Gryc V., Horáček P., Šlezingerová J. et al. Basic density of spruce wood, wood with bark, and bark of branches in locations in the Czech Republic. *Wood Research*. 2011. Vol. 56. Iss. 1. Pp. 23–32. <http://www.woodresearch.sk/wr/201101/03.pdf> (reference date: 05.12.2023).
2. Grishchenko A. V., Kucheryavyi V. A., Tomchuk R. I. et al. *Tree crown: industrial and recreational use*. Lvov: Vyshcha Shkola, 1985. 168 p.
3. Kowaluk G., Szymanowski K., Kozłowski P. et al. Functional Assessment of Particleboards Made of Apple and Plum Orchard Pruning. *Waste and Biomass Valorization*. 2020. Vol. 11. Iss. 6. Pp. 2877–2886. DOI: 10.1007/s12649-018-00568-8
4. Gilanipoor N., Spinelli R., Naghdi R. et al. Utilization of woody pruning residues of apple trees. *Forest Science and Technology*. 2020. Vol. 16, Iss. 4. Pp. 216–223. DOI: 10.1080/21580103.2020.1845822
5. Usolzew W. A. Birkenäste als Rohstoff für die Herstellung von Holzspanplatten. *Bauinformation* (Berlin). 1971. Vol. 9. P. 140. (In Germ.).
6. Druzhinin A. V., Lazareva A. D. Plastics from a mixture of birch bast and outer bark without added binding agents. In: *Wood boards and plastics: interu-*

niversity collection of scientific papers. Iss. 2. Sverdlovsk: Ural'skij lesotekhnicheskij institute, 1975. Pp. 141–145. (In Russ.).

7. Ogunwusi A. A. Potentials of Industrial Utilization of Bark. *Journal of Natural Sciences Research*. 2013. Vol. 3. Iss. 5. Pp. 106–115.

8. Rosell J. A., Gleason S., Mendez-Alonzo R. et al. Bark functional ecology: evidence for tradeoffs, functional coordination, and environment producing bark diversity. *New Phytologist*. 2014. Vol. 201. Iss. 2. Pp. 486–497. DOI: 10.1111/nph.12541

9. Ilek A., Van Stan J. T., Morkisz K. et al. Vertical Variability in Bark Hydrology for Two Coniferous Tree Species. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2021. Vol. 4. Art. 687907. DOI: 10.3389/ffgc.2021.687907

10. Ilek A., Siegert C. M., Wade A. Hygroscopic contributions to bark water storage and controls exerted by internal bark structure over water vapor absorption. *Trees*. 2021. Vol. 35. Iss. 3. Pp. 831–843. DOI: 10.1007/s00468-021-02084-0

11. Aubrey D. P. Relevance of Precipitation Partitioning to the Tree Water and Nutrient Balance. In: *Precipitation partitioning by vegetation: A global synthesis*, eds. J. T. Van Stan, E. Gutmann, J. Friesen. Switzerland: Springer, 2020. Pp. 147–162. DOI: 10.1007/978-3-030-29702-2_10

12. Carmichael M. J., White J. C., Cory S. T. et al. Foliar water uptake of fog confers ecophysiological benefits to four common tree species of southeastern freshwater forested wetlands. *Ecohydrology*. 2020. Vol. 13. Iss. 7. Art. e2240. DOI: 10.1002/eco.2240

13. Jenkins J. C., Chojnacky D. C., Heath L. S. et al. National-Scale Biomass Estimators for United States Tree Species. *Forest Science*. 2003. Vol. 49. Iss. 1. Pp. 12–35. DOI: 10.1093/FORRESTSCIENCE/49.1.12

14. Morhart C., Sheppard J. P., Schuler J. K. et al. Above-ground woody biomass allocation and within tree carbon and nutrient distribution of wild cherry (*Prunus avium* L.) – a case study. *Forest Ecosystems*. 2016. Vol. 3. Iss. 2. Art. 4. DOI: 10.1186/s40663-016-0063-x

15. Jones J. M., Heineman K. D., Dalling J. W. Soil and species effects on bark nutrient storage in a premontane tropical forest. *Plant and Soil*. 2019. Vol. 438. Iss. 1–2. Pp. 347–360. DOI: 10.1007/s11104-019-04026-9

16. Usoltsev V. A. Branch qualimetry in Scots pine of Aman-Karagai Forest. *Bulletin of Agricultural Science of Kazakhstan*. 1985. No 7. Pp. 74–78. EDN: SPUQAP (In Russ.).

17. Usoltsev V. A. Tables for tree-based accounting of aboveground phytomass of birch and aspen in Northern Kazakhstan. In: *Rational use and increasing the sustainability of forests in Kazakhstan*. Shchuchinsk, 1983. Pp. 143–164. (The manuscript was deposited in KazNIINTI on July 7, 1983, No. 478 Ka-D 83). EDN: UCPOMV (In Russ.).

18. Usoltsev V. A. Modeling of the structure and dynamics of phytomass of stands: monograph. Krasno-

yarsk: Krasnoyarsk State University Publ., 1985. 191 p. EDN: TFMPKD (In Russ.).

19. Sirois D. L. Biomass of Four Hardwoods from Lower Piedmont Pine-Hardwood Stands in Alabama. General Technical Report SO-46. USDA Forest Service. New Orleans: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1983. 18 p. DOI: 10.2737/SO-GTR-46

20. Zimmermann G. L. The Wood and Bark Biomass and Production of *Populus tremuloides*, *Abies lasiocarpa* and *Picea engelmannii* in Northern Utah. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science in forest ecology. Logan: Utah State University, 1979. 84 p. DOI: 10.26076/5708-93ab

21. Ker M. F. Weight relationships for balsam fir and black spruce in Western Newfoundland. Information Report N-X-136. Newfoundland: Environment Canada, Forest Service, Newfoundland Forest Research Centre St. John's, 1975. 23 p. URL: <https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/handle/1845/239193> (reference date: 05.12.2023).

22. Broshtilova M. Nadzemna fitomasa na mladi kulturi ot vlahnonizinen (vardimski) dub (*Quercus longipes* Stev.) pri dva tipa mestorasteniya [Above-ground phytomass of young *Quercus longipes* Stev. plantations on two site types]. *Gorskostopanska Nauka [Forest Science]*. 1983. Vol. 20. Iss. 6. Pp. 40–50. (In Bulgar.).

23. Benčát T. Black locust biomass production in Southern Slovakia. Bratislava: VEDA, 1989. 191 p.

24. Vakurov A. D. Estimation of total phytomass in green-moss pine forests. In: *Productivity of organic and biological mass of the forest*. Moscow: Nauka, 1974. Pp. 11–15. (In Russ.).

25. Kazimirov N. I., Volkov A. D., Zyabchenko S. S. et al. Matter and energy metabolism in the pine forests of the European North. Leningrad: Nauka, 1977. 304 p. (In Russ.).

26. Bhat K. M., Bhat K. V., Dhamodaran T. K. Wood and bark properties of branches of selected tree species growing in Kerala. Research Report 29. Kerala Forest Research Institute, India, 1985. 34 p. URL: <https://docs.kfri.res.in/KFRI-RR/KFRI-RR029.pdf> (reference date: 05.12.2023).

27. Usoltsev V. A. Birch twigs as a raw material for the production of particle boards. Information Bulletin of the Latvian Research Institute of Forestry Problems (reviews of the Institute's current research). Riga: Latvian Research Institute of Forestry Problems, 1971. Pp. 78–83. (In Russ.).

28. Usoltsev V. A. Small-sized birch and aspen wood assortments for particle board production. *Chipboard and Plywood. Reference information*. 1975. No 10. Pp. 6–7. (In Russ.).

29. Gabeyev V. N. Biological productivity of the forests of the Ob' river's region. Novosibirsk: Nauka. 1976. 171 p. (in Russ.).

30. Vyskot M. Biomass of the tree layer of a spruce forest in the Bohemian Uplands. Praha: Academia, 1981. 397 p.
31. Danilin I. M., Tsogt Z., Usoltsev V. A. Above-ground phytomass of larch and birch trees in the forests of Central Siberia and Eastern Khentey. *Eko-Potential*. 2015. No 1 (9). Pp. 33–36. EDN: TMCPZB (In Russ.).
32. Gabdelkhakov A. K. Aboveground phytomass of small-leaved linden trees in plantations and coppice stands. *Eko-Potential*. 2015. No 3 (11). Pp. 7–13. EDN: UKKWZH (In Russ.).
33. Corral-Rivas J. J., Vega-Nieva D. J., Rodríguez-Soalleiro R. et al. Compatible system for Predicting Total and Merchantable Stem Volume over and under Bark, Branch Volume and Whole-Tree Volume of Pine Species. *Forests*. 2017. Vol. 8. Iss. 11. Art. 417. DOI: 10.3390/f8110417
34. Jucker T., Fischer F. J., Chave J. et al. Tallo: a global tree allometry and crown architecture database. *Global Change Biology*. 2022. Vol. 28. Iss. 17. Pp. 5254–5268. DOI: 10.1111/gcb.16302
35. Usoltsev V. A. Single-tree biomass data for remote sensing and ground measuring of Uralsian forests. Monograph. Electronic database. 3rd updated electronic edition. Ekaterinburg: Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2023. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12451> (reference date: 05.12.2023). (In Russ.).
36. Usoltsev V. A. Forest biomass and primary production database for Eurasia. Monograph. Electronic database. The fourth edition, enlarged. Yekaterinburg: Botanical Garden of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2023. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/12452> (reference date: 05.12.2023). (In Russ.).
37. Gribanov L. N., Lagov I. A., Chaban P. S. Forests of Kazakhstan. In: *Forests of the USSR*. Moscow: Nauka, 1970. Vol. 5. Pp. 5–77. (In Russ.).
38. Usoltsev V. A. Stem taper, density and dry matter content in biomass of trees growing in Central Eurasia: CD-monograph. Yekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 2020. URL: <https://elar.usfeu.ru/handle/123456789/9649> (reference date: 05.12.2023).
39. Draper N. R., Smith H. Applied regression analysis / Transl. from English by Yu. P. Adler, V. G. Gorsky. Moscow: Statistika Publ., 1973. 392 p.
40. Baskerville G. L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Canadian Journal of Forest Research*. 1972. Vol. 2. Iss. 1. Pp. 49–53. DOI: 10.1139/X72-009
41. Maurin' A. M., Liepa I. Ya., Drike A. Ya. et al. Prediction of fruiting of woody plants. In: *Optimization of the use and reproduction of forests in the USSR*. Moscow: Nauka, 1977. Pp. 50–53. (In Russ.).

The article was submitted 19.12.2023; approved after reviewing 11.03.2024; accepted for publication 25.03.2024

For citation: Plyukha N. I., Usoltsev V. A., Tsepordey I. S. Modeling the Share of the bark in the Phytomass of Branches of Scots Pine in the Steppe Zone. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest Ecology. Nature Management*. 2024. № 1 (61). Pp. 44–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.44>; EDN: BRQGYX

Information about the authors

Nikolai I. Plyukha – Postgraduate student, Ural State Forestry Engineering University. Research interests – forestry, forest taxation. Author of eight scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1628-3300>; SPIN: 4682-7412

Vladimir A. Usoltsev – Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Professor of the Department of Forest Taxation and Forest Management, Ural State Forestry Engineering University. Research interests – forestry, forest taxation, phytogeography. Author of 905 scientific publications, including 43 monographs. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>; SPIN: 3668-6843

Ivan S. Tsepordey – Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Research interests – forestry, forest taxation, phytogeography. Author of 105 scientific publications, including five monographs. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4747-5017>; SPIN: 3853-7684

Availability of data and materials: The datasets analyzed in the study are publicly available.

Contribution of the authors:

Plyukha N.I. – carrying out experimental work, paper writing and preparation.

Usoltsev V.A. – setting research goals and objectives; program and methodology development.

Tsepordey I.S. – program and methodology development; performing experimental work; paper writing and preparation.

The authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 630*52:630*174.754

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.55>

EDN: DEMOOK

Введение в культуру *in vitro* зелёных неодревесневших черенков дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) разных возрастных групп

А. А. Тимаков^{1✉}, Р. В. Сергеев¹, Е. М. Романов¹, А. Р. Хусаинова², В. Г. Краснов¹

¹ Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
Российская Федерация, 127434, Москва, ул. Тимирязевская, 49

TimakovAA@volgatech.net ✉

Введение. Дуб черешчатый – основная лесообразующая порода дубрав. Малая эффективность традиционного размножения дуба черешчатого на фоне снижения общей продуктивности дубрав является проблемой для всего мира и России в частности. Решить проблему можно благодаря применению современных методов культуры ткани *in vitro*. **Цель исследования** – разработать методику получения первичных эксплантов дуба на основе зелёных черенков. **Задачи работы** – 1) оценить влияние минерального состава питательной среды и обработки эксплантов аскорбиновой кислотой на эффективность введения эксплантов дуба разных возрастных групп; 2) определить воздействие питательной среды и режима стерилизации на экспланты дуба на ювенильной, имматурной и генеративной стадиях развития. **Материалы и методы исследования.** Объектами исследования были выбраны черенки дуба черешчатого *Quercus robur* L. разных возрастных групп – ювенильной, имматурной и генеративной. Методы исследования были основаны на общепринятых классических приемах работы с культурами изолированных тканей и органов растений, в результате которых были получены жизнеспособные экспланты дуба черешчатого, а также проведены корреляционно-регрессионный и дисперсионный анализ. **Результаты.** Большое количество жизнеспособных ювенильных эксплантов было получено на питательной среде по прописи WPM – от 96,43 до 100 %. Наибольшая доля не жизнеспособных ювенильных эксплантов приходится на вариант опыта с питательной средой по прописи MS – 22,22 %. Наибольшее количество жизнеспособных стерильных эксплантов на генеративной фазе было получено на питательной среде по прописи WPM – от 70,59 до 100 %. При этом наибольшее число жизнеспособных стерильных эксплантов получено при использовании экспозиции в стерилизующем средстве от 4 мин. 30 сек. **Выводы.** Наибольшее количество жизнеспособных стерильных эксплантов на ювенильной фазе было получено на питательной среде по прописи WPM – от 96,43 до 100 %, в то время как по прописи MS – 77,78 %. Таким образом, среда WPM является лучшим выбором при введении в культуру зелёных черенков дуба черешчатого при выбранном режиме стерилизации. Наибольшее количество жизнеспособных стерильных эксплантов на генеративной фазе было получено на питательной среде по прописи WPM – от 70,59 до 100 % по сравнению с 50 % на питательной среде по прописи MS. Значительное влияние на количество жизнеспособных стерильных эксплантов оказал режим стерилизации и оптимальная экспозиция зелёных черенков дуба черешчатого в генеративной фазе в 3 % растворе Лизоформина 3000 начинается от 4,5 мин. с показателями жизнеспособности эксплантов от 87,5 до 100 %. Полученные результаты можно использовать для разработки технологии размножения и выращивания дуба черешчатого *in vitro*.

Ключевые слова: эксплант; поверхностная стерилизация; питательная среда; клональное микроразмножение

© Тимаков А. А., Сергеев Р. В., Романов Е. М., Хусаинова А. Р., Краснов В. Г., 2024

Для цитирования: Тимаков А. А., Сергеев Р. В., Романов Е. М., Хусаинова А. Р., Краснов В. Г. Введение в культуру *in vitro* зелёных неодревесневших черенков дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) разных возрастных групп // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 1 (61). С. 55–65. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.55>; EDN: DEMOOK

Введение. Дуб черешчатый является основной лесообразующей породой таких биоценозов, как дубравы. Дубовые леса России в основном располагаются в европейской (3,52 млн. га) и дальневосточной частях (2,46 млн. га) [1]. Однако представители рода *Quercus* подвержены множеству негативных факторов, среди которых: большое количество паразитирующих насекомых, ухудшение санитарного состояния, снижение общей и удельной продуктивности дубовых биоценозов; снижение репродуктивной способности (т. е. увеличение промежутков между урожайными годами и снижение обилия урожая); синдром усыхания (отмирания) дуба и т. д. [2, 3]. Эти проблемы приводят к сокращению общей площади дубовых биоценозов. В связи с длительным сокращением площадей естественных дубрав разработаны федеральные программы их сохранения и изучения, причём эта проблема характерна не только для России [3–5]. Таким образом, малая эффективность традиционного размножения дуба черешчатого на фоне снижения общей и удельной продуктивности дубрав является объективной проблемой для всего мира и России в частности. Решить проблему можно благодаря применению современных методов биотехнологии, например, культуры ткани *in vitro*. Данный метод отличается внесезонностью проведения исследований, ювенилизацией посадочного материала, высокой эффективностью. Однако ключевым фактором является оздоровление получаемого посадочного материала. Кроме того, культура ткани растений является эффективным инструментом сохранения биологических ресурсов, а полученные стерильные экспланты могут при необходимости быть использованы для ещё более надёжного криодепонирования, создания «банков» ценных генотипов [6]. Частным случаем метода культуры ткани *in vitro* является клональное микроразмножение [7–8].

Проблематика клонального микроразмножения дуба черешчатого и введение этого растения в культуру *in vitro* освеще-

на в работах Г. Л. Бутовой [9–10], В. И. Белоус [11–12], С. Ю. Белоус и Ю. Коломиец [13], А. А. Марчук и В. И. Кирилук [14], В. Г. Краснова с соавт. [15], G. Vengadesan, P. M. Pijut [16], E. Gatti, E. Sgarbi [17], D. Civinova, Z. Sladky [18], A. Grigorescu et al. [19] и др. Основной проблемой является стабильное получение стерильной хорошо растущей культуры эксплантов дуба черешчатого. Причина – значительная доля заражения во взрослых растениях (до 92 %) в зависимости от вида, ареала произрастания и т. д. [5]. Таким образом, разработка эффективных и вариативных методов введения в культуру *in vitro* биоматериала дуба черешчатого является актуальным направлением в лесной биотехнологии.

При введении в культуру *in vitro* растительные экспланты проходят процедуру поверхностной стерилизации, при этом используются различные дезинфицирующие средства, способные эффективно удалять с поверхности эксплантов бактериальные и грибные инфекции. Например, сотрудники ВНИИЛГИС-биотех смогли получить 80–100 % жизнеспособных асептических эксплантов при использовании 0,02 % раствора мертиолята в течение 10 мин. [20].

Цель настоящего исследования – разработать методику получения первичных эксплантов дуба на основе зелёных черенков.

Задачи исследования – 1) оценить влияние минерального состава питательной среды и обработки эксплантов аскорбиновой кислотой на эффективность введения эксплантов дуба разных возрастных групп; 2) определить воздействие питательной среды и режима стерилизации на экспланты дуба на ювенильной, иматурной и генеративной стадиях развития.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования были выбраны черенки дуба черешчатого *Quercus robur* L. разных возрастных групп – ювенильной, иматурной и генеративной. Источником ювенильного биоматериала послужили сеянцы дуба черешчатого возрастом

2–2,5 мес., высотой до 20–25 см, имматурного – растения высотой 65–70 см, генеративного – около 10 м высотой. Все группы растений были разнесены по местоположению – сеянцы были выращены в комнатных условиях, имматурный биоматериал был получен в деревне Малые Мазары (Республика Марий Эл), а генеративный биоматериал был получен в городских условиях – микрорайон Дубки (г. Йошкар-Ола).

Исследование выполнено на базе Центра коллективного пользования «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный технологический университет». Методы исследования были основаны на общепринятых классических приёмах работы с культурами изолированных тканей и органов растений [8], в результате которых были получены жизнеспособные экспланты дуба черешчатого, а также проведены корреляционно-регрессионный и дисперсионный анализы.

1. *Получение жизнеспособных эксплантов дуба черешчатого на ювенильной фазе онтогенеза.* Для проведения исследования в январе 2023 года были посеяны жёлуди дуба черешчатого (в кассеты), появившиеся в феврале 2023 года проростки были пересажены в отдельные ёмкости большего объёма и доращивались до возраста 2–2,5 месяцев. Для посева и пересадки использовали садовую почву, обработанную в целях обеззараживания раствором марганцево-кислого калия (0,5 %). Двухмесячные растения затем использовали в качестве источника эксплантов: зелёные побеги срезали до первой розетки в пять листьев, после чего разделяли на фрагменты длиной 3–4 см, удаляли все листовые пластинки (таким образом, чтобы не повредить пазушные почки) и погружали в водопроводную воду на 60 мин. Затем экспланты очищали от механических загрязнений с помощью губки и моющего средства «Ника» (5 мл средства на 500 мл

воды), промывали в проточной водопроводной воде в течение 5 мин., а затем трёхкратно промывали в дистиллированной воде.

Дальнейшие операции проводили в условиях ламинар-бокса. Экспланты помещали в 3 % раствор стерилизующего средства Лизоформин 3000 на 5 мин., после чего двукратно промывали в стерильной дистиллированной воде в течение 5 мин., а затем (в зависимости от варианта опыта, табл. 1) помещали либо в стерильную дистиллированную воду на 20 мин., либо в стерильный раствор аскорбиновой кислоты концентрацией 100 мг/л. Затем на эксплантах, для удаления повреждённых стерилизующим веществом тканей, обновляли все срезы. После этого экспланты переносили на агаризованную питательную среду, либо по прописи MS (контроль) [21], либо по прописи WPM [22] в зависимости от варианта опыта (табл. 1). Во все варианты питательных сред добавлялся регулятор роста – бензиламинопурина (БАП) в концентрации 1 мг/л. Культивирование вели в условиях световой комнаты при температуре 23–24 °С. Подсчёт заражённых, жизнеспособных и не жизнеспособных эксплантов проводили после одной недели культивации.

Таблица 1. Схема эксперимента по стерилизации ювенильных эксплантов дуба черешчатого при обработке аскорбиновой кислотой

Table 1. Scheme of the experiment on sterilization of juvenile explants of English oak when treated with ascorbic acid

№	Состав питательной среды	Наличие обработки эксплантов аскорбиновой кислотой, да/нет
1	MS 1 БАП, контроль	нет
2	WPM 1 БАП	нет
3	WPM 1 БАП	да

2. *Получение жизнеспособных эксплантов дуба черешчатого на имматурной и генеративной фазах онтогенеза.* Для проведения исследования использовали

свежесрезанные (не более суток до введения в культуру *in vitro*) зелёные побеги растущего дуба черешчатого в период с начала по конец мая 2023 года. Зелёные побеги дуба черешчатого в имматурной фазе онтогенеза из-за своей малочисленности были вынесены в отдельный вариант. Зелёные побеги дуба черешчатого подготавливали аналогично эксперименту 1 (получение жизнеспособных эксплантов на ювенильной фазе онтогенеза).

Дальнейшие операции проводили в условиях ламинар-бокса. Экспланты помещали в 3 % раствор стерилизующего средства Лизоформин 3000. Время экспозиции варьировалось от 3 мин. 30 сек. до 5 мин. с шагом в 30 сек. для черенков, взятых со взрослого растения, и только 5 мин. для частично одревесневших зелёных черенков и имматурных. После этого экспланты во всех вариантах промывали, обрабатывали аскорбиновой кислотой и культивировали аналогично эксперименту 1. Контролем выступал вариант среды по прописи MS [21] с добавлением БАП в концентрации 1 мг/л.

Результаты и их обсуждение. Во всех вариантах эксперимента по введению в культуру зелёных черенков двухмесячных саженцев дуба черешчатого была достигнута высокая стерильность эксплантов – заражение проявилось лишь в одном варианте с показателем 3,57 % (табл. 2).

Большое количество жизнеспособных эксплантов было получено на питательной среде по прописи WPM – от 96,43 до 100 % [22]. Наибольшая доля не жизнеспособных растений приходится на вариант опыта с питательной средой по прописи MS – 22,22 % [21]. Оценить влияние обработки раствором аскорбиновой кислоты эксплантов на жизнеспособность растений не удалось (относительная доля жизнеспособных эксплантов между вариантами на среде WPM отличалась незначительно). Однако в процессе выполнения эксперимента было замечено, что возникновение потемнения эксплантов в варианте с аскорбиновой кислотой значительно замедлялось (до 1 сут. вместо 30–60 секунд после обновления срезов в вариантах без обработки). Возможно, лучших результатов можно было бы достичь при включении аскорбиновой кислоты в состав питательной среды, как в опыте María José Cernadas et al. [3]. После проведения подсчётов (спустя одну неделю культивирования) экспланты переносили на свежую питательную среду и вели культивирование дальше. В результате большинство эксплантов образовали зелёные побеги, а также каллус на местах срезов (рис. 1). Образование каллуса в вариантах опыта с концентрацией бензиламинопурина 1 мг/л также наблюдалось в опыте Quinsheng Li et al. [4].

Таблица 2. Стерилизация ювенильных эксплантов дуба черешчатого при обработке аскорбиновой кислотой

Table 2. Sterilization of juvenile explants of English oak when treated with ascorbic acid

№	Вариант	Всего эксплантов, шт.	Заражённые экспланты, %	Стерильные экспланты, %	
				жизнеспособные	не жизнеспособные
1	MS 1 БАП, 5 мин., без аск. к-ты, контроль	27	0	77,78	22,22
2	WPM 1 БАП, 5 мин., без аск. к-ты	26	0	100	0
3	WPM 1 БАП, 5 мин., с аск. к-той	28	3,57	96,43	0

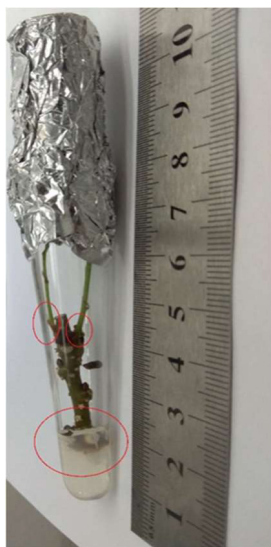


Рис. 1. Эксплант дуба черешчатого спустя месяц культивации, с каллусом на срезе и зелёными побегами

Fig. 1. Explant of English oak after one month of cultivation, with callus at the cut edge and green shoots

В эксперименте по получению жизнеспособных эксплантов дуба черешчатого на имматурной и генеративной фазах онтогенеза были получены данные о влиянии минерального состава питательных сред и экспозиции в стерилизующем средстве Лизоформин 3000 на жизнеспособность эксплантов из зелёных неодревесневших черенков дуба черешчатого (табл. 3). Наибольшее количество жизнеспособных стерильных эксплантов на генеративной фазе было получено на питательной среде по прописи WPM – от 70,59 до 100 % по сравнению с 50 % на питательной среде по прописи MS. При этом

наибольшее число жизнеспособных стерильных эксплантов получено при использовании экспозиции от 4 мин. 30 сек. (100 %). Схожий результат был получен при стерилизации ювенильного материала в эксперименте В. Г. Краснова и др. [15], где наибольшее число жизнеспособных эксплантов было получено при 4 мин. стерилизации в 3 % растворе лизоформина. Появление доли не стерильных эксплантов в варианте опыта с экспозицией в 5 мин. может быть обусловлено наличием эндогенной инфекции. По вариантам опыта с эксплантами, взятыми с растения в генеративной фазе, проведён корреляционно-регрессионный анализ (рис. 2), результаты дисперсионного анализа приведены в табл. 4. После проведения подсчёта жизнеспособные экспланты переносили на свежую питательную среду и продолжали культивацию, при этом замечено образование побегов (рис. 3). Экспланты, взятые с растения в имматурной фазе онтогенеза, показали 100 % жизнеспособность при выбранном режиме стерилизации, что аналогично таковым показателям при таком же режиме стерилизации и для зелёных неодревесневших черенков, взятых с взрослого растения, и для эксплантов, взятых с саженцев. Высокий показатель заражённости частично неодревесневших черенков предположительно обусловлен значительной обсеменённостью исходного материала (рис. 3), поскольку высокие показатели заражённости (48 %)

Таблица 3. Получение жизнеспособных эксплантов дуба черешчатого на имматурной и генеративной фазах онтогенеза при варьируемой экспозиции в лизоформине

Table 3. Obtaining viable explants of English oak at the immature and generative stages of ontogenesis with varying lengths of exposure to Lysoformin

№	Вариант	Всего эксплантов, шт.	Заражённые экспланты, %	Стерильные экспланты, %	
				жизнеспособные	не жизнеспособные
1	MS 1 БАП, 5 мин., ген., контроль	28	3,57	50	46,43
2	WPM 1 БАП, 5 мин., ген.	16	12,5	87,5	0
3	WPM 1 БАП, 4,5 мин., ген.	16	0	100	0
4	WPM 1 БАП, 4 мин., ген.	20	15	85	0
5	WPM 1 БАП, 3,5 мин., ген.	17	29,41	70,59	0
6	WPM 1 Гб, 5 мин., одрев., ген.	70	55,71	44,29	0
7	WPM 1 БАП, 5 мин., имм.	14	0	100	0

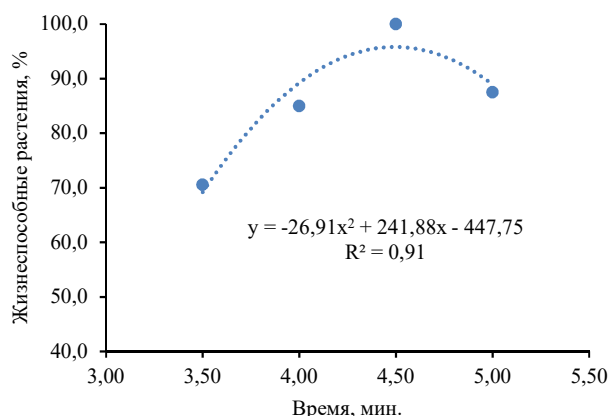


Рис. 2. Влияние экспозиции в стерилизующем растворе на долю жизнеспособных растений

Fig. 2. Effect of exposure to a sterilizing solution on the proportion of viable plants



Рис. 3. Заражённый одревесневший эксплант дуба черешчатого (1) и жизнеспособный эксплант дуба черешчатого с зелёным побегом (2) на свежей питательной среде
Fig. 3. (1) Infected lignified explant of English oak. (2) Viable explant of English oak with a green shoot on fresh nutrient medium

Таблица 4. Влияние режима стерилизации на количество жизнеспособных растений

Table 4. Effect of sterilization regime on the number of viable plants

Источник вариации	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Средний квадрат	Критерии Фишера		Доля влияния, %
				Ф-расч.	Ф-таб.	
Время стерилизации	13 291,84	1	13291,84	182,18	5,99	96,8
Прочие факторы	437,76	6	72,96	-	-	3,2
Итого	13 729,6	7		-	-	100

биоматериала дуба были обнаружены в опыте Andrea N. Brennan et al. [5], причём эти показатели сильно варьировались не только между видами, но и в пределах одного вида дуба (например, для дуба брусничного 60–92 %).

Результаты однофакторного дисперсионного анализа показали, что в $F_{\text{расч.}}(182,18) > F_{\text{таб.}}=5,99$, что доказывает достоверность данного суждения. Доля влияния режима стерилизации на количество жизнеспособных эксплантов 96,8 %, а остальные 3,2 % объясняются влиянием других факторов.

Выводы. Наибольшее количество жизнеспособных стерильных эксплантов на ювенильной фазе было получено на питательной среде по прописи WPM – от

96,43 до 100 % [22], в то время как по прописи MS – 77,78 % [21]. Таким образом, среда WPM является лучшим выбором при введении в культуру зелёных черенков дуба черешчатого при выбранном режиме стерилизации. Оценить влияние обработки раствором аскорбиновой кислоты на жизнеспособность растений не удалось.

Наибольшее количество жизнеспособных стерильных эксплантов на генеративной фазе было получено на питательной среде по прописи WPM – от 70,59 до 100 % по сравнению с 50 % на питательной среде по прописи MS. Значительное влияние на количество жизнеспособных стерильных эксплантов оказал режим стерилизации (коэффициент детерминации $R^2=0,91$) и оптимальная экспозиция зелёных черенков

дуба черешчатого в генеративной фазе в 3 % растворе Лизоформина 3000 начинается от 4,5 мин. с показателями жизнеспособности эксплантов от 87,5 до 100 %.

Полученные результаты можно использовать для разработки технологии размножения и выращивания дуба черешчатого *in vitro*.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Калиниченко Н. П. Дубравы России. М.: ВНИИЦлесресурс, 2000. 536 с.
2. Молчанов А. А. Воздействие антропогенных факторов на лес. М.: Наука, 1978. 136 с.
3. Conservation of holm oak (*Quercus ilex*) by *in vitro* culture / M. J. Cernadas, M. T. Martínez, E. Corredoira et al. // *Mediterranean Botany*. 2018. Vol. 39. Iss. 2. Pp. 97–104. DOI: 10.5209/MBOT.60779
4. Li Q., Gu M., Deng M. In Vitro Propagation of Oriental White Oak *Quercus aliena* Blume // *Forests*. 2019. Vol. 10. Iss. 6. Art. 463. DOI: 10.3390/f10060463
5. Tissue Culture Using Mature Material for the Conservation of Oaks / A. N. Brennan, V. C. Pence, M. D. Taylor et al. // *HortTechnology*. 2017. Vol. 27. Iss. 5. Pp. 644–649. DOI: 10.21273/HORTTECH03801-17
6. Зайцева Ю. Г., Новикова Т. И. Клональное микроразмножение *Rhododendron dauricum* // *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Биология, клиническая медицина*. 2014. Т. 12. № 1. С. 26–31. EDN: RXMKAN
7. The effect of Plantform™ bioreactor on micropropagation of *Quercus robur* in comparison to a conventional *in vitro* culture system on gelled medium, and assessment of the micro-environment influence on leaf structure / E. Gatti, E. Sgarbi, E. A. Ozudogru et al. // *Plant Biosystems*. 2017. Vol. 151. Iss. 6. Pp. 1129–1136. DOI: 10.1080/11263504.2017.1340356
8. Бутенко Р. Г. Биология клеток высших растений *in vitro* и биотехнологии на их основе. М.: ФБК-ПРЕСС, 1999. 160 с.
9. Бутова Г. П., Скробова Л. Л. Морфогенез и регенерация растений дуба черешчатого в культуре *in vitro* // *Физиология растений*. 1988. Т. 35. № 5. С. 1023–1030.
10. Бутова Г. П. Экспериментальные предпосылки для клонального микроразмножения дуба черешчатого // *Биология культивируемых клеток и биотехнология: международная конференция, Новосибирск, 2–6 августа 1988. Тезисы докладов в 2-х ч.* Новосибирск: ИЦИГ, 1988. С. 366.
11. Белоус В. И. Новый способ прививки дуба и других лиственных пород // *Лесохозяйственная информация*. 1971. № 4. 14 с.
12. Белоус В. И. Районирование клоновых лесосеменных плантаций дуба на Украине // *Лесохозяйственная информация*. 1973. № 20. 8 с.
13. Белоус С. Ю., Коломиец Ю. Биотехнологические аспекты введения в культуру *in vitro* Дуба Максима Зализняка // *Материалы междунар. науч. конференции к 75-летию Национального ботанического сада им. Гришко НАН Украины: Интродукция растений и обогащения биоразнообразия в ботанических садах и дендропарках* (Киев, 15-17 сентября 2010). Киев: «Академперіодика» НАН України, 2010. С. 583–585.
14. Марчук А. А., Кирилюк В. И. Сохранение и размножение ценных генотипов *in vitro* // *Научные доклады НАУ*. 2008. № 4 (12) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/nd/2008-4/08moogiv.pdf> (дата обращения: 05.10.2023).
15. Разработка режима стерилизации взрослого и ювенильного биоматериала дуба черешчатого (*Quercus Robur* L.) для введения в культуру тканей / В. Г. Краснов, Р. В. Сергеев, Е. М. Романов и др. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование*. 2021. № 1 (49). С. 94–103. DOI: 10.25686/2306-2827.2021.1.94; EDN: HBLLMU
16. Vengadesan G., Pijut P. M. In vitro propagation of northern red oak (*Quercus rubra* L.) // *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. 2009. Vol. 45. Iss. 4. Pp. 474–482. DOI: 10.1007/s11627-008-9182-6
17. Gatti E., Sgarbi E. Micropropagation of *Quercus robur*: explant sources and cultural conditions affect *in vitro* responses differently // *ISHS Acta Horticulturae 1083: VIII International Symposium on In Vitro Culture and Horticultural Breeding*. 2015. Vol. 1083. Art. 38. Pp. 303–310. DOI: 10.17660/ActaHortic.2015.1083.38
18. Cívínová D., Sladký Z. A study of the regeneration capacity of oak (*Quercus robur* L.) // *Scripta Facultatis Scientiarum Naturalium Universitatis J. E. Purkynianae Brunensis. Biologia*. 1987. Vol. 17. No 3–4. Pp. 103–110.
19. Grigorescu A., Iordan M., Enescu V. Aspecte privind acomodarea la conditii septice a plantelor de stejar (*Quercus robur* L.) regenerate prin culturi "in vitro" // *Revista pădurilor. Silvicultură și exploatarea pădurilor*. 1987. Vol. 102. No 1. Pp. 19–22.
20. Гусева О. Ю., Стародубцева Л. М., Попов В. Н. Получение морфогенных культур *in vitro* дуба черешчатого с использованием эксплантов из ювенильного и взрослого материала // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2018. № 2. С. 18–29. DOI: 10.21178/2079-6080.2018.2.18; EDN: VLPNDX

21. *Murashige T., Skoog F.* A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures // *Physiologia Plantarum*. 1962. Vol. 15. Iss. 3. Pp. 473–497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

22. *Lloyd G. B., McCown B. H.* Commercially-feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia*, by use of shoot-tip culture // *Combined Proceedings, International Plant Propagator's Society*. 1980. Vol. 30. Pp. 421–427.

Статья поступила в редакцию 17.10.2023; одобрена после рецензирования 19.12.2023; принята к публикации 25.12.2023

Информация об авторах

ТИМАКОВ Алексей Александрович – аспирант кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – биотехнология растений. Автор десяти научных публикаций. SPIN-код: 6306-1287

СЕРГЕЕВ Роман Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – лесная биотехнология. Автор 50 научных публикаций. SPIN-код: 1479-7956

РОМАНОВ Евгений Михайлович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – выращивание лесопосадочного материала, искусственное лесовосстановление, утилизация органических отходов, управление лесным хозяйством. Автор 212 научных публикаций. SPIN-код: 8291-5546

ХУСАИНОВА Алия Ренатовна – аспирант, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. Область научных интересов – биотехнология растений. Автор 17 научных публикаций. SPIN-код: 2342-8951

КРАСНОВ Виталий Геннадьевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – искусственное лесовыращивание, восстановление дубрав, выращивание посадочного материала. Автор 160 научных публикаций. SPIN-код: 3179-8907

Вклад авторов:

Тимаков А. А. – методология исследования, проведение экспериментов, анализ полученных результатов, подготовка исходного текста.

Сергеев Р. В. – редактирование текста, научная консультация.

Романов Е. М. – научное руководство, научная консультация.

Хусаинова А. Р. – подготовка исследования (приготовление питательных сред), информационный поиск.

Краснов В. Г. – редактирование текста, проведение статистического анализа, окончательное утверждение версии для публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*52:630*174.754

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.55>

EDN: DEMOOK

In vitro Culture Initiation of Green Cuttings of English Oak (*Quercus robur* L.) of Different Age Groups

A. A. Timakov^{1✉}, R. V. Sergeev¹, E. M. Romanov¹, A. R. Khusainova², V. G. Krasnov¹

¹ Volga State University of Technology,

3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
49, Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russian Federation

TimakovAA@volgatech.net✉

ABSTRACT

Introduction. English oak (*Quercus robur* L.) is the main forest-forming species of oak forests. The low efficiency of conventional propagation of English oak in the context of the overall decrease in the productivity of oak forests is a problem for the whole world and Russia in particular. The issue can be addressed through the use of modern in vitro tissue culture methods. **The purpose of the study** is to develop a method for obtaining primary oak explants from green cuttings. **The objectives** of the work are to (1) assess the influence of the mineral composition of the nutrient medium and the treatment of explants with ascorbic acid on the effectiveness of the introduction of oak explants of different age groups, and (2) determine the effect of the nutrient medium and sterilization regime on English oak explants at the juvenile, immature and generative stages of development. **Materials and methods.** The objects of the study were English oak cuttings of different age groups including the juvenile, immature and generative ones. The research methods were based on the generally accepted, classical techniques of working with cultures of isolated plant tissues and organs. As a result, viable explants of English oak were obtained, and correlation-regression and variance analyses were carried out. **Results.** A large number of viable juvenile explants was obtained on a nutrient medium prepared according to the Woody Plant Medium (WPM) recipe (from 96.43% to 100%). The largest percentage of non-viable juvenile explants was recorded in the experimental option employing a nutrient medium composed according to the Murashige and Skoog (MS) medium recipe (22.22%). The maximum number of viable sterile explants at the generative phase was obtained on the WPM medium (from 70.59% to 100%). Moreover, the largest number of viable sterile explants was recorded when using the exposure to a sterilizing agent for a period of 4.5 minutes or more. **Conclusions.** The greatest yield of viable sterile explants at the juvenile phase was observed when using a nutrient medium formulated according to the WPM recipe (96.43% to 100%), while their share on a medium based on the MS medium composition was 77.78%. Thus, WPM is the best choice for the introduction of green cuttings of English oak to in vitro culture under the selected sterilization regime. The largest number of viable sterile explants at the generative phase was obtained on the nutrient medium formulated according to the WPM recipe (from 70.59% to 100%), compared to 50% of those cultured on the nutrient medium according to the MS medium composition. The sterilization regime had a significant impact on the number of viable sterile explants. The optimal time of exposure of English oak green cuttings at the generative phase to a 3% solution of Lysoformin 3000 starts from 4.5 minutes, with the explant viability rates ranging from 87.5% to 100%. The results obtained can be used to develop a technology for propagating and growing *Quercus robur* L. in vitro.

Keywords: explant; surface sterilization; nutrient medium; clonal micropropagation

REFERENCES

1. Kalinichenko N. P. Oak forests of Russia. Moscow: VNIITslesresurs, 2000. 536 p. (In Russ.).
2. Molchanov A. A. Impact of anthropogenic factors on the forest. Moscow: Nauka, 1978. 136 p. (In Russ.).
3. Cernadas M. J., Martínez M. T., Corredoira E. et al. Conservation of holm oak (*Quercus ilex*) by in vitro culture. *Mediterranean Botany*. 2018. Vol. 39. Iss. 2. Pp. 97–104. DOI: 10.5209/MBOT.60779
4. Li Q., Gu M., Deng M. In Vitro Propagation of Oriental White Oak *Quercus aliena* Blume. *Forests*. 2019. Vol. 10. Iss. 6. Art. 463. DOI: 10.3390/f10060463
5. Brennan A. N., Pence V., Taylor M. D. et al. Tissue Culture Using Mature Material for the Conser-

vation of Oaks. *HortTechnology*. 2017. Vol. 27. Iss. 5. Pp. 644–649. DOI: 10.21273/HORTTECH03801-17

6. Zaytseva Yu. G., Novikova T. I. Clonal micropropagation of *Rhododendron dauricum*. *Vestnik NSU. Series: Biology and Clinical Medicine*. 2014. Vol. 12. Iss. 1. Pp. 26–32. EDN: RXMKAH (In Russ.).

7. Gatti E., Sgarb E., Aylin E. et al. The effect of Plantform™ bioreactor on micropropagation of *Quercus robur* in comparison to conventional *in vitro* culture system on gelled medium, and assessment of the microenvironment influence on leaf structure. *Plant Biosystems*. 2017. Vol. 151. Iss. 6. Pp. 1129–1136. DOI: 10.1080/11263504.2017.1340356

8. Butenko R. G. Biology of cells of higher plants *in vitro* and biotechnologies on their basis. Moscow: FBK-PRESS, 1999. 160 p. (In Russ.).

9. Butova G. P., Skrobova L. L. Morphogenesis and recovery of English oak *in vitro*. *Russian Journal of Plant Physiology*. 1988. Vol. 35. Iss. 5. Pp. 1023–1030. (In Russ.).

10. Butova G. P. Experimental prerequisites for clonal micropropagation of English oak. *Biology of Cultured Cells and Biotechnology: abstracts of papers of the International conference; Novosibirsk, 2-6 August 1988. In 2 parts*. Novosibirsk: Institute of Cytology and Genetics SB USSR AS, 1988. P. 366 (In Russ.).

11. Belous V. I. A novel method of inoculation of oak and other hardwood species. *Forestry Information*. 1971. No 4. 14 p. (In Russ.).

12. Belous V. I. Zoning of the clonal seed plantations of oak in the Ukraine. *Forestry Information*. 1973. No 20. 8 p. (In Russ.).

13. Bilous S., Kolomiets Iu. Biotechnological aspects for introduction *in vitro* of Maksim Zaliznyak oak. *Proceeding of International conference dedicated to the 75th anniversary of M. M. Gryshko National Botanic Garden of NASU: Introduction of plants and biodiversity enrichment in botanical gardens and dendrological parks (Kyiv, September, 15–17 2010)*. Kyiv: "Akadempriodika" NAS of Ukraine, 2010. Pp. 583–585. (In Ukr.).

14. Marchuk A. A., Kiriliuk V. I. Preservation and propagation of valuable genotypes *in vitro*. *Scientific Reports of NAS*. 2008. No 4 (12). URL: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/nd/2008-4/08mogiv.pdf> (reference date: 05.10.2023). (In Russ.).

15. Krasnov V. G., Sergeev R. V., Romanov E. M. et al. Elaboration of the Regime for Sterilization of Adult and Juvenile Biomaterial of English Oak (*Quercus Robur* L.) for Introduction *in vitro*. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2021. No 1 (49). Pp. 94–103. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2021.1.94>; EDN: HBLLMU (In Russ.).

16. Vengadesan G., Pijut R. M. *In vitro* propagation of northern red oak (*Quercus rubra* L.). *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. 2009. Vol. 45. Iss. 4. Pp. 474–482. DOI: 10.1007/s11627-008-9182-6

17. Gatti E., Sgarbi E. Micropropagation of *Quercus robur*: explant sources and cultural conditions affect *in vitro* responses differently. *ISHS Acta Horticulturae 1083: VIII International Symposium on In Vitro Culture and Horticultural Breeding*. 2015. Vol. 1083. Art. 38. Pp. 303–310. DOI: 10.17660/ActaHortic.2015.1083.38

18. Civinová D., Sladký Z. A study of the regeneration capacity of oak (*Quercus robur* L.). *Scripta Facultatis Scientiarum Naturalium Universitatis J. E. Purkynianae Brunensis. Biologia*. 1987. Vol. 17. No 3–4. Pp. 103–110.

19. Grigorescu A., Iordan M., Enescu V. Aspecte privind acomodarea la condiții septice a plantelor de stejar (*Quercus robur* L.) regenerate prin culturi "in vitro". *Revista pădurilor. Silvicultură și exploatarea pădurilor*. 1987. Vol. 102. No 1. Pp. 19–22. (In Roman.)

20. Guseva O. Yu., Starodubtseva L. M., Popov V. N. Obtaining morphogenic cultures *in vitro* of pedunculate oak using explants from juvenile and adult material. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2018. No. 2. Pp. 18–29. DOI: 10.21178/2079-6080.2018.2.18; EDN: VLPNDX (In Russ.).

21. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962. Vol. 15. Iss. 3. Pp. 473–497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

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

The article was submitted 17.10.2023; approved after reviewing 19.12.2023; accepted for publication 25.12.2023

For citation: Timakov A. A., Sergeev R. V., Romanov E. M., Khusainova A. R., Krasnov V. G. *In vitro* Culture Initiation of Green Cuttings of English Oak (*Quercus Robur* L.) of Different Age Groups. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2024. № 1 (61). Pp. 55–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.55>; EDN: DEMOOK

Information about the authors

Aleksey A. Timakov – Postgraduate student, Department of Forest Plantations, Selection and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – plant biotechnology. Author of ten scientific publications. SPIN: 6306-1287

Roman V. Sergeev – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Forest Plantations, Selection and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – forest biotechnology. Author of 50 scientific publications. SPIN: 1479-7956

Evgeny M. Romanov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Department of Forest Plantations, Selection and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – cultivation of forest planting material, artificial reforestation, recycling of organic waste, forest management. Author of 212 scientific publications. SPIN: 8291-5546

Aliya R. Khusainova – Graduate Student, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy. Research interests – plant biotechnology. Author of 17 scientific publications. SPIN: 2342-8951

Vitaly G. Krasnov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Department of Forest Plantations, Selection, and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – artificial reforestation, restoration of oak forests, cultivation of forest planting material. Author of 160 scientific publications. SPIN: 3179-8907

Contribution of the authors:

Timakov A. A. – research methodology development, performing the experiments, analysis of the results obtained, preparation of the initial draft.

Sergeev R. V. – reviewing and editing, scientific guidance.

Romanov E. M. – research supervision, scientific guidance.

Khusainova A. R. – research process preparation (preparation of nutrient media), information search.

Krasnov V. G. – reviewing and editing, statistical analysis, approval of the final version of the manuscript for publication.

The authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА FORESTRY TECHNOLOGIES AND MACHINES

Научная статья

УДК 630*31

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.66>

EDN: XGUBTS

Обоснование технологии лесосечных работ в горельниках с содействием естественному восстановлению сосны

Ю. А. Ширнин[✉], А. Ю. Ширнин, С. А. Денисов,
И. В. Петухов, П. Н. Анисимов

Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

ShirninYA@volgatech.net[✉]

Введение. Исследования естественного возобновления леса на гарях 1921 и 1972 годов показали, что подрост сосны появляется не только за счёт налёта семян из крон сохранившихся живых деревьев, но также из шишек погибших от огня деревьев. Количественные и качественные параметры семян сосны после огневого воздействия были установлены экспериментально и подтверждены при обследовании горельников 2021 года. Совмещение заготовки древесины сосны в горельниках с использованием потенциала естественного возобновления сосны требует технологического решения. **Цель** исследования – обоснование технологии заготовки лесоматериалов в товарных горельниках сосны и оценка её по времени выполнения технологических элементов. **Объектами** являются процессы лесосечных работ с содействием естественному возобновлению сосны в товарных горельниках. **Методами** исследования являются анализ и синтез технологий машинной заготовки лесоматериалов в товарных сосновых горельниках и статистическая обработка результатов хронометражных наблюдений. **Результаты.** Проведённый анализ позволил выявить новые технологические приёмы заготовки лесоматериалов, использующие первичный постпирогенный лесовосстановительный потенциал сосны для её естественного возобновления. В результате синтеза получено новое техническое решение – способ заготовки сортиментов машинами манипуляторного типа в товарных горельниках сосны с обеспечением естественного возобновления сосны. **Выводы.** Предложенный способ рубки леса обеспечивает заготовку сортиментов в товарных горельниках сосны с сохранением семенного материала на вырубке. Увеличение среднего времени цикла обработки одного дерева по предлагаемому способу не существенно и не приводит к значительному снижению производительности харвестера.

Ключевые слова: лесные пожары; система машин; способ разработки горельников; хронометражные наблюдения

Введение. Вопросы о значении крупных лесных пожаров и о ликвидации их последствий в Поволжье неоднократно поднимались в научной литературе, начиная с пожаров 1921 года [1, 2]. Особый интерес к этим вопросам возник после пожа-

ров 1972 года, последствия которых обсуждались на разных уровнях [3], включая вопросы как естественного возобновления леса, так и искусственного лесовосстановления [3, с. 68–75; 4]. Ликвидация последствий этих пожаров включает в себя как

© Ширнин Ю. А., Ширнин А. Ю., Денисов С. А., Петухов И. В., Анисимов П. Н., 2024

Для цитирования: Ширнин Ю. А., Ширнин А. Ю., Денисов С. А., Петухов И. В., Анисимов П. Н. Обоснование технологии лесосечных работ в горельниках с содействием естественному восстановлению сосны // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 1 (61). С. 66–75. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.66>; EDN: XGUBTS

ускоренную вырубку древесины, не потерявшей ещё своей товарности, так и необходимость восстановления лесов и их приёмы [5–7]. Восстановление лесов на гарях 1972 года было проведено со значительной долей лесокультурных работ. Однако искусственное восстановление, особенно крупных площадей гарей, требует значительных затрат финансовых средств и трудовых ресурсов. Естественное же возобновление сосны в этих условиях возможно только при наличии жизнеспособных семян сосны.

Количественные и качественные параметры семян сосны при огневом воздействии были определены экспериментально [8] и в дальнейшем подтверждены при обследовании горельников 2021 года [9]. Выявлено, что в погибших при низовых пожарах сосновых древостоях всхожесть семян сосны, находившихся в шишках, сохраняется на уровне 80 % [9].

Успешному накоплению самосева и подроста сосны способствует минерализация почвы, что осуществляется либо почвообрабатывающими орудиями, либо прохождением огня [5, 10]. Быстрая заготовка товарной древесины сосны с огневой очисткой вырубок не позволяет использовать для лесовосстановления сохранившие всхожесть семена (первичный постпирогенный лесовосстановительный потенциал). Ожидание распространения семян весной следующего после пожара года приводит к частичной потере товарности древесины [3, с. 110–113]. Это противоречие между возможным успешным естественным лесовосстановлением и срочной заготовкой товарной древесины сосны в горельниках требует технологического решения.

Цель исследования – обоснование технологии заготовки лесоматериалов в товарных горельниках сосны с содействием естественному лесовосстановлению и оценка времени выполнения технологических элементов.

Объектом исследования является технологический процесс лесосечных работ на гарях, направленный на ускоренную заготовку древесины и содействие

естественному возобновлению сосны системой лесосечных машин «харвестер + форвардер».

Методологией исследования являются анализ технологических элементов лесосечных работ машинами при заготовке лесоматериалов [11] в товарных сосновых горельниках и синтез технологии заготовки древесного сырья с учётом процесса естественного возобновления сосны.

Результаты и их обсуждение. Акт лесопатологического обследования древостоев, пройденных пожаром, даёт основание для назначения и проведения сплошных или выборочных санитарных рубок. Погибшие и усыхающие деревья, как правило, быстро заселяются стволовыми вредителями и дереворазрушающими грибами, что обуславливает потерю товарных и технических качеств древесины [3, с. 110–113]. Поэтому лесозаготовки в погибших вследствие лесных пожаров древостоях должны проводиться в кратчайшие сроки, после получения акта ЛПО.

В то же время, использование наличия всхожих семян сосны в погибших древостоях [9] для естественного лесовосстановления позволит исключить или значительно снизить [5] затраты на искусственное лесовосстановление после вырубки горельников.

В филиале ПГТУ «Учебно-опытное лесничество» основной системой машин на лесосечных работах является «харвестер + форвардер». Харвестер выполняет обрабатывающие и переместительные операции. К обрабатывающим относятся спиливание дерева, обрезка сучьев и раскряжёвка хлыстов на сортименты. Традиционно основным продуктом харвестера считаются круглые лесоматериалы. Однако в контексте нашей публикации крона, сучья с шишками и семенами тоже являются продукцией, при этом они подвергаются перемещению.

Траектория переместительных операций начинается возле каждого спиленного дерева, а заканчивается там, где необходимо разместить продукцию. Круглые лесоматериалы целесообразно укладывать у во-

лока, обеспечивая минимальное расстояние от места спиливания дерева до грузового отсека форвардера, при его движении по центру обрабатываемой харвестером ленты леса. Ветви (крону) с шишками и семенами желателно разместить равномерно по всей ширине обрабатываемой ленты леса, в надежде на равномерное распределение семян и последующих всходов сосны.

Важным элементом перемещения является отрыв шишек от сучьев и попадание семян на почву. Это происходит при столкновении кроны с поверхностью почвы при валке дерева. Чем больше сила удара кроны с поверхностью почвы или снежного покрова, тем интенсивнее опадение шишек.

В отличие от валки бензопилой, где последняя стадия валки – свободное падение дерева, при валке харвестером ствол после спиливания удерживается подвижной харвестерной головкой, что позволяет управлять процессом падения дерева. Для усиления соударения кроны с почвой нужно увеличить скорость поворота вершинной части дерева к моменту соударения, что вполне осуществимо манипулятором с харвестерной головкой.

Патентные исследования позволили выявить отсутствие технологий заготовки лесоматериалов машинами на горельниках, способствующих естественному возобновлению леса. В рассмотренных публикациях и патентах основные отличительные элементы относятся к траектории и месту размещения, после спиливания дерева, обрезке сучьев и раскряжёвки, на обрабатываемой ленте леса лесоматериалов и кроны¹ [7, 11]. Место размещения определяется целями сохранения подроста, сокращения времени выполнения технологических элементов, сохранения жизнеспособности оставляемых на доращивание особей при выборочных рубках и т. п.

¹ Азаренок В. А., Герц Э. Ф., Мехренцев А. В. Сортиментная заготовка леса: учебное пособие. Екатеринбург: РИО Уральская государственная лесотехническая академия, 2000. 138 с. EDN: VYLCQZ

Анализ исследований показал также, что для естественного возобновления сосны при разработке товарных горельников следует в процессе обрезки сучьев после валки деревьев оставлять кроны с шишками на месте срезания, равномерно распределяя их ветви по территории вырубki².

В соответствии с задачами исследования на основании патентного поиска был разработан способ заготовки сортиментов системой машин «харвестер + форвардер», обеспечивающий существенное увеличение сохранности семян сосны на территории вырубki [12, 13] (рис. 1, 2).

Предлагаемый способ наряду с заготовкой лесоматериалов в товарных горельниках обеспечивает сохранение семенного материала в качестве меры содействия естественному возобновлению сосны.

Усиление удара кроны о почву обеспечивается резким подъёмом и поворотом харвестерной головки после спиливания дерева, в результате чего дерево из положения 3 перемещается в положение 6 (рис. 1). Таким образом, после спиливания, в процессе падения, комлевая часть дерева, ещё зажатая в головке харвестера, приподнимается манипулятором, создавая условия, усиливающие удар верхней части ствола с кроной о почву или снежный покров. Такое действие будет способствовать интенсивному отряхиванию шишек с кроны.

На рис. 2 представлена технологическая схема работы системы машин харвестер + форвардер. На ленте леса 1, поражённой низовым пожаром, харвестером 2 первоначально обрабатываются деревья 3 на полосе будущего волока 4, затем деревья, расположенные ближе к границам волока с выполнением валки деревьев, обрезки сучьев и раскряжёвки хлыстов.

² Обоснование ресурсосберегающих технологий лесопромышленного комплекса, адаптированных к природным условиям Пермского края, с минимизацией затрат на лесовосстановление / Денисов С. А., Торопов А. С., Микрюкова Е. В. и др. Отчёт о НИР № 6.6-29/2 от 03.08.2007. Министерство промышленности и природных ресурсов Пермского края. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. 181 с. EDN: WIQAWB

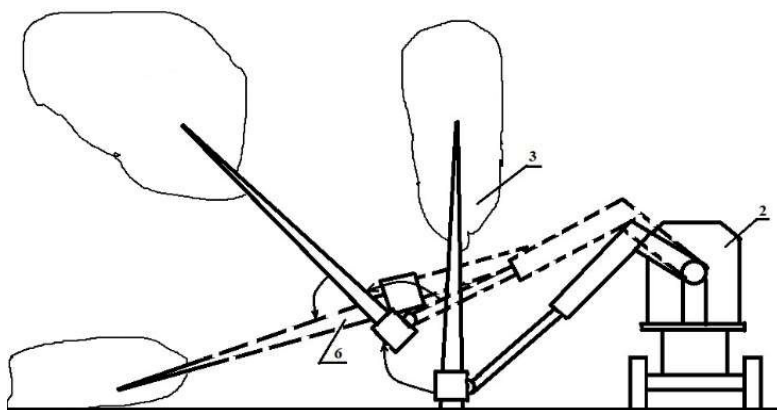


Рис. 1. Схема валки дерева, обеспечивающая соударение вершинной части с кроной с поверхностью ленты леса

Fig. 1. Tree felling scheme ensuring the collision of the top part of the trunk with the crown with the surface of the forest belt

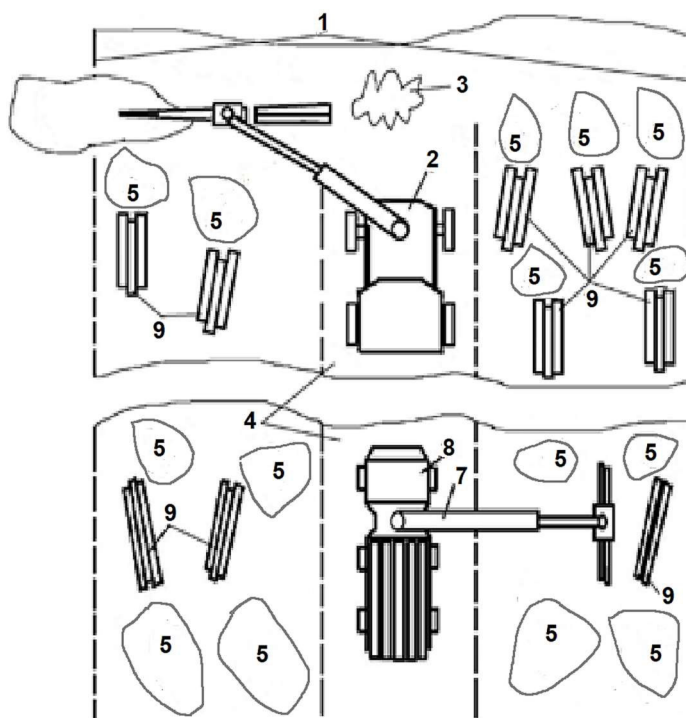


Рис. 2. Технологическая схема работы системы машин харвестер + форвардер

Fig. 2. Technological scheme of the harvester + forwarder machine system

Ветви с шишками 5 по возможности следует располагать равномерно по площади обрабатываемой ленты леса путём выбора соответствующего места. Место обрезания, раскряжёвки и укладки лесоматериалов должно быть в пределах досягаемости манипулятора 7 форвардера 8 при его расположении на волоке во время сбора и погрузки лесоматериалов 9. За счёт этого одновременно со сбором и погрузкой лесоматериалов

осуществляется по необходимости повторное распределение ветвей с шишками по территории разрабатываемой ленты грейферным захватом манипулятора. Предлагаемый способ обеспечивает заготовку лесоматериалов системой машин «харвестер + форвардер» в товарных горельниках после низовых пожаров и способствует сохранности семенного материала для естественного возобновления сосны.

Логично предположить, что наибольшая плотность отряхиваемых шишек будет на площадке, которую займёт боковая поверхность кроны упавшего дерева.

Площадь проекции кроны на вертикальную плоскость³:

$$S_k = \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot H_k \cdot D_k, \text{ м}^2, \quad (1)$$

где ξ_1 – коэффициент формы кроны; ξ_2 – коэффициент густоты заполнения кроны (ветвями, хвоей, листьями). Для сосны $\xi_1 = 0,67$, $\xi_2 = 0,4\text{--}0,5$; для ели и пихты $\xi_1 = 0,5$, $\xi_2 = 0,75$.

Высота кроны:

$$H_k = \psi_1 \cdot l_x, \text{ м}, \quad (2)$$

где l_x – длина хлыста (ствола), м; ψ_1 – коэффициент пропорциональности между высотой кроны и длиной хлыста. $\psi_1 = (0,5\div 0,65)$ – для ели, пихты; $(0,2\div 0,3)$ – для сосны.

Условный диаметр кроны по срединному (миделевому) сечению:

$$D_k = \psi_2 \cdot H_k, \text{ м}, \quad (3)$$

где ψ_2 – коэффициент пропорциональности между высотой и диаметром кроны; $\psi_2 = (0,2\div 0,25)$ – для ели; $0,3$ – для сосны.

Относительная плотность опавших шишек со всхожими семенами может быть рассчитана как отношение площади боковой поверхности крон срубленных деревьев к площади вырубки. Данная величина может выступать в качестве предварительного параметра, дающего общее представление о большей или меньшей вероятности успешного возобновления сосны.

В процессе обрезки сучьев контуры куч сучьев и их площадь могут меняться и не в полной мере соответствовать значению, получаемому по формуле (1). Степень закрытия площади вырубки ветвями с шишками будет зависеть не только от густоты, формы и размеров кроны сваленных деревьев, но и от навыков машинистов харвестера и форвардера.

Предлагаемый способ заготовки лесоматериалов существенно повысит степень концентрации и равномерности распределения семян сосны на территории вырубки. Этого можно добиться дополнительным динамическим воздействием харвестера на спиленное дерево. При этом выполняются новые технологические приёмы машинной заготовки лесоматериалов (подъём ствола, выбор места обрезки сучьев и раскряжёвки хлыстов, распределение ветвей по территории обрабатываемой ленты), обеспечивающие использование первичного постпирогенного семенного потенциала сосны после лесных пожаров для последующего естественного лесовосстановления.

Таким образом, предлагаемый способ заготовки лесоматериалов машинами манипуляторного типа в сосновых товарных горельниках позволяет обеспечить непосредственно на месте валки очистку деревьев от сучьев и раскряжёвку хлыстов с оставлением большей части шишек со всхожими семенами непосредственно на месте валки, что будет способствовать естественному возобновлению сосны.

Экспериментальная заготовка лесоматериалов по предлагаемому способу осуществлялась работниками филиала Поволжского государственного технологического университета «Учебно-опытный лесхоз» в квартале 95 Чернушкинского лесного участка. Работа проведена комплектом машин харвестер КХ-451 Сильватек 8266 ТН Sleipner и форвадер Komatsu 840.4. Наблюдение осуществлялось путём съёмки процесса заготовки лесоматериалов на видеокамеру. После съёмки путём просмотра видеоматериалов составлялся лист хронометражных наблюдений за работой харвестера по предлагаемому способу с выделением продолжительности элементов технологического процесса в расчёте на каждое обработанное дерево. При этом ставилась задача выявить и зафиксировать продолжительность этих элементов при двух режимах работы харвестера, без подъёма и с подъёмом комлевой части ствола (табл.).

³ Лесное ресурсоведение: учебник / Ю. А. Ширнин [и др.]; под общ. ред. проф. Ю. А. Ширнина. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2012. 356 с.

Средняя продолжительность элементов работы харвестера без подъёма и с подъёмом ствола при валке дерева и средние параметры деревьев

The average duration of the harvester work elements without lifting and with lifting the trunk during tree felling; the average parameters of trees

Движение на рабочей позиции, с	Наведение, захват, спиливание, с	Падение, подтаскивание, с	Протаскивание ствола при обрезке сучьев и раскряжёвке, с	Среднее время цикла обработки одного дерева, с	Диаметр в комле, см	Длина ствола, м	Объём хлыста, м³
Без подъёма							
1,4	11,4	6,4	41,01	60,21	18,14	19,4	0,31
С подъёмом							
1,5	11,95	8,25	43,07	64,77	17,19	17,72	0,31

Границы между технологическими элементами времени принято называть фиксажными точками (ФТ). Время цикла обработки одного дерева при двух режимах работы харвестера без подъёма и с подъёмом комлевой части ствола разбивалось на четыре технологических элемента:

1) движение харвестера на рабочую позицию (ФТ – «начало движения харвестера»);

2) движение харвестерной головки к дереву и его захват (ФТ – «начало движения харвестерной головки»);

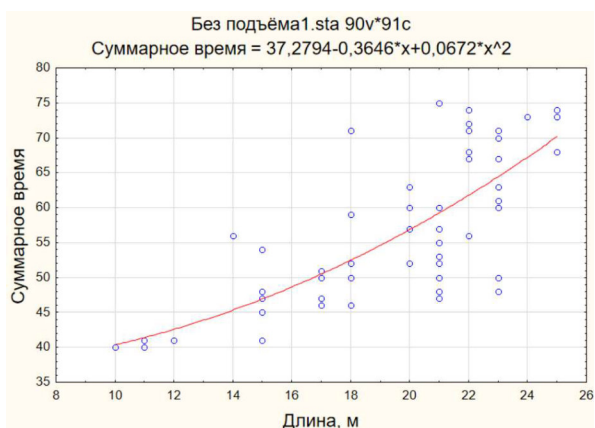
3) спиливание, падение дерева с подъёмом комля, подтаскивание дерева к месту обрезки сучьев и раскряжёвки (ФТ – «начало спиливания»);

4) протаскивание ствола при обрезке сучьев, раскряжёвка хлыстов (ФТ – «начало протаскивания»).

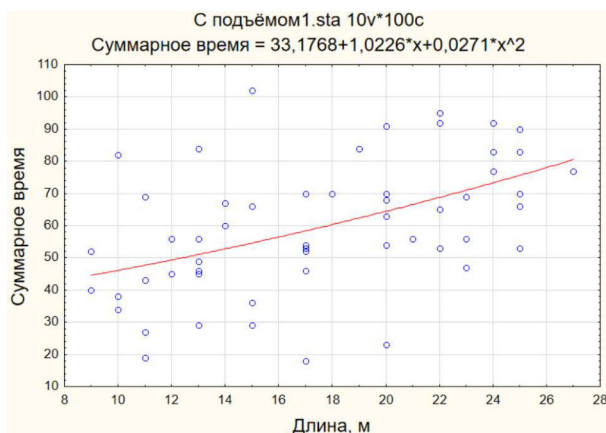
Исследования позволили выполнить сравнение продолжительностей техно-

логических элементов операции традиционным и предлагаемым способом с подъёмом комлевой части ствола при падении дерева.

Обработка экспериментальных данных выполнялась с использованием программы Statistica-12. Рассеяние значений средней продолжительности технологических элементов обработки одного дерева в зависимости от длины ствола без подъёма и с подъёмом комлевой части при падении представлены на рис. 3. Такое рассеяние значений средней продолжительности элементов обработки одного дерева обусловлено как ситуационной обстановкой и расположением деревьев на лесосеке, так и введением нового элемента в технологический процесс. Представленные на рис. 3 регрессионные зависимости носят ориентировочный характер, но позволяют сравнить два варианта исполнения технологического элемента.



а) без подъёма



б) с подъёмом

Рис. 3. Рассеяние значений продолжительности элементов времени в зависимости от длины ствола обрабатываемого дерева без подъёма и с подъёмом комлевой части при падении

Fig. 3. The spread of values of the duration of time elements depending on the length of the trunk of the processed tree without lifting and with lifting of its butt part during falling

Средняя продолжительность технологических элементов обработки одного дерева харвестером при двух режимах его работы с подъёмом и без подъёма комлевой части ствола при валке и средние параметры обработанных деревьев представлена в таблице.

Таким образом, среднее время на обработку одного дерева с подъёмом составило 64,77 с, а без подъёма – 60,21 с. При среднем объёме хлыста 0,31 м³ расчётная сменная производительность харвестера составила 117 м³ с подъёмом и 126 м³ без подъёма.

Выводы

1. Системой машин «харвестер + форвардер» можно организовывать технологический процесс лесосечных работ, одновременно увеличивая долю сохранности семенного материала для естественного возобновления сосны в поражённых низовым пожаром сосновых насаждениях.

2. Предлагаемый способ рубки леса наряду с заготовкой лесоматериалов системой машин «харвестер + форвардер» в поражённых низовыми пожарами лесных массивах способствует росту доли сохранности семенного материала на вырубке путём стряхивания шишек с крон в процессе валки деревьев и равномерного распределения кроны после валки по территории вырубки, что повышает вероятность естественного возобновления сосны на вырубках.

3. Анализ результатов хронометражных наблюдений показал, что увеличение средней продолжительности цикла обработки харвестером одного дерева по предлагаемому способу не существенно и в полной мере компенсируется содействием естественному возобновлению леса на гари за счёт реализации первичного постпирогенного лесовосстановительного потенциала сосны.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яшинов Л. И. Обзор исследований лесовозобновления на гарях Маробласти, проведённых кафедрой общего лесоводства Казанского института сельского хозяйства и лесоводства // Известия Казанского института сельского хозяйства и лесоводства. 1930. № 1. С. 18–26.
2. Петров А. П. Типы возобновления гарей Волжского леспромхоза // МАО (Марийская Автономная Область): науч.-популяр. и политико-эконом. журн.: Орган Марийс. науч.-исслед. ин-та, Обл. плановой комис. и Обл. бюро краеведения. 1934. № 2–3. С. 56.
3. Проблемы ликвидации последствий лесных пожаров 1972 г. в Марийской АССР: сборник докл. и выступлений на выездном заседании секции лесного хозяйства и лесной промышленности Научн.-техн. совета МВ и ССО СССР, проходившем в Йошкар-Оле с 16 по 21 сент. 1974 г. М-во высш. и сред. спец. образования СССР, Марийский политехн. ин-т им. М. Горького; ред. А. К. Денисов. Йошкар-Ола: Маркнигоиздат, 1976. 143 с.
4. Калинин К. К., Иванов А. В., Лисов Н. А. Рекомендации по ведению хозяйства в лесах, повреждённых пожарами. М.: Министерство лесного хозяйства РСФСР, 1986. 86 с.
5. Санников С. Н., Подшивалов В. А., Санников Д. С. Рекомендации по содействию естественному возобновлению главных пород на гарях в лесах Западной Сибири. Екатеринбург: Научно-исследовательский совет УрО РАН, 2000. 51 с. EDN: TYZPUG
6. Денисов С. А. Регулирование роли берёзы в естественном возобновлении гарей // Лесное хозяйство. 1979. № 7. С. 19–21.
7. Патент RU № 2769472 C1, МПК A01G23/08. Способ посадки, выращивания культур и выборочных рубок с заготовкой сортиментов машинами на возобновляемых искусственным путём лесных площадях / Ю. А. Ширнин, А. Ю. Ширнин, И. Г. Гайсин, В. Н. Коновалов, С. В. Марихин; заявитель и патентообладатель ПГТУ. Заявка № 2021130999; заявл. 25.10.2021; опубл. 01.04.2022, Бюл. № 10. 7 с. EDN: LKEXKM
8. Денисов С. А., Шакирова З. Н. Влияние температурных условий низового пожара на всхожесть семян сосны обыкновенной // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 4 (36). С. 35–47. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.35; EDN: YKYQXI
9. Влияние пожара в сосняке брусничном на всхожесть и качественные особенности семян сосны / С. А. Денисов, З. Н. Домрачева, К. А. Мотова и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2022. № 2 (54). С. 26–39. DOI: 10.25686/2306-2827.2022.2.26; EDN: UWBFUO

10. Калинин К. К. Крупные лесные пожары в лесном Среднем Заволжье и система лесохозяйственных мероприятий по ликвидации их последствий: монография. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2012. 364 с. EDN: TUMOXB

11. Сравнение и выбор вариантов выполнения элементов технологических операций при работе системы машин «харвестер+форвардер» / Ю. А. Ширнин, И. Г. Гайсин, С. Г. Рыганова и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2021. № 2 (50). С. 42–51. DOI: 10.25686/2306-2827.2021.2.42; EDN: SAZTZB

12. Разработка повреждённых низовым пожаром горельников системой машин «харвестер + фор-

вардер» / Ю. А. Ширнин, А. Ю. Ширнин, С. А. Денисов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2022. № 2 (54). С. 55–63. DOI: 10.25686/2306-2827.2022.2.55; EDN: DPGXCY

13. Патент RU № 2781950 C1, МПК A01G23/02. Способ заготовки сортиментов машинами манипуляторного типа в поражённых низовыми пожарами лесных массивах с обеспечением естественного возобновления сосны / Ю. А. Ширнин, А. Ю. Ширнин, С. А. Денисов, М. Н. Волдаев; заявитель и патентообладатель ПГТУ. Заявка № 2022106098; заявл. 09.03.2022; опубл. 21.10.2022, Бюл. № 30. 7 с. EDN: OQMXFI

Статья поступила в редакцию 19.01.2024; одобрена после рецензирования 18.03.2024; принята к публикации 27.03.2024

Информация об авторах

ШИРНИН Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лесопромышленных и химических технологий, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – моделирование и оптимизация технологических параметров лесозаготовок, эффективность технологических процессов. Автор 300 научных публикаций. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4509-1324>; SPIN-код: 4947-2182

ШИРНИН Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – моделирование и оптимизация технологических параметров лесозаготовок, эффективность технологических процессов. Автор 60 научных публикаций. SPIN-код: 7890-5335

ДЕНИСОВ Сергей Александрович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – лесоведение, лесоводство, лесная пирология. Автор 150 научных публикаций. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8805-1253>; SPIN-код: 9711-7130

ПЕТУХОВ Игорь Валерьевич – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и производства ЭВС. Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – интеллектуальный анализ, человеко-машинные системы, автоматическое управление. Автор 160 научных публикаций. ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-2365-4857>; SPIN-код: 6009-1846

АНИСИМОВ Павел Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Поволжский государственный технологический университет. Автор 80 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7789-2399>; SPIN-код: 9087-4940

Вклад авторов:

Ширнин Ю. А. – методология исследования, подготовка исходного текста.

Ширнин А. Ю. – подготовка исследования, патентный поиск, обработка материалов хронометража.

Денисов С. А. – лесоводственное обоснование, подбор объектов, научная консультация, подготовка окончательной версии для публикации.

Петухов И. В. – редактирование текста, научная консультация.

Анисимов П. Н. – проведение экспериментов, анализ полученных результатов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630*31

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.66>

EDN: XGUBTS

Justification of the Technology of Logging Operations Promoting the Natural Regeneration of Pine in Burnt Areas

Yu. A. Shirnin[✉], A. Yu. Shirnin, S. A. Denisov, I. V. Petukhov, P. N. Anisimov

Volga State University of Technology,
3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation
ShirninYA@volgatech.net ✉

ABSTRACT

Introduction. Studies of natural forest regeneration in the burnt areas of 1921 and 1972 showed that pine regrowth appears not only due to the fall of seeds from the crowns of surviving living trees, but also from the cones of trees killed by fire. The quantitative and qualitative parameters of pine seeds after fire exposure were established experimentally and confirmed during a survey of pine forests in 2021. Combining the harvesting of pine wood in burnt forests with the use of the natural regeneration potential of pine requires a technological solution. **The purpose of the study** is to substantiate the technology for harvesting timber in commercial fire-damaged pine forests and evaluate it based on the time it takes to complete the technological elements. **The objects** are the processes of logging operations that promote the natural regeneration of pine in commercial fire-damaged forests. **The research methods** are analysis and synthesis of technologies for machine harvesting of timber materials in commercial fire-damaged pine forests, and statistical processing of the time study results. **Results.** The analysis made it possible to identify new technological methods for harvesting timber that use the primary post-pyrogenic regeneration potential of pine for its natural recovery. As a result of the synthesis, a new technical solution was obtained – a method for preparing assortments using manipulator-type machines in commercial fire-damaged pine stands, ensuring the natural regeneration of pine. **Conclusion.** The proposed method of logging ensures the harvesting of assortments in commercial fire-damaged pine forests while preserving the seed material in the logging area. The increase in the average cycle time for processing one tree using the proposed method is not significant and does not lead to a significant reduction in harvester productivity.

Keywords: forest fires; machine system; method of burnt forest area development; time observations

REFERENCES

1. Yashnov L. I. Review of the studies of reforestation on the burnt areas of Maroblast, carried out by the General Silviculture Department of Kazan Institute of Agriculture and Forestry. *News of Kazan Institute of Agriculture and Forestry*. 1930. No 1. Pp. 18-26. (In Russ.).
2. Petrov A. P. Types of regeneration of burnt areas of the Volzhsky Lespromhoz. *MAO (Mari Autonomous Oblast): popular science and politico-economic journal: Organ of the Mari Research Institute, Regional Planning Commission, and Regional Bureau of Local History*. 1934. No 2–3. P. 56. (In Russ.).
3. Problems of eliminating the consequences of forest fires of 1972 in Mari ASSR: Collection of reports and speeches of the offsite meeting of the Section of Forestry and Forest Industry of the Scientific and Technical Education of the USSR, held in Yoshkar-Ola on September 16–21, 1974. Ministry of Higher and Middle Special Education of the USSR, Mari Polytechnic Institute named after M. Gorky, et al. Ed. by A. K. Denisov. Yoshkar-Ola: Marknigoizdat, 1976. 143 p. (In Russ.).
4. Kalinin K. K., Ivanov A. V., Lisov N. A. Recommendations on the management of forests damaged by fires. Moscow: Ministry of Forestry of RSFSR, 1986. 66 p. (In Russ.).
5. Sannikov S. N., Podshivalov V. A., Sannikov D. S. Recommendations for promoting natural regeneration of the main species in the burnt areas in the forests of Western Siberia. Ekaterinburg: Scientific Council of UrO RAN, 2000. 51 p. EDN: TYZPUG (In Russ.).
6. Denisov S. A. The role of birch in the natural forest regeneration. *Forestry*. 1979. No. 7. Pp. 19–21. (In Russ.).
7. Shirnin Yu. A., Shirnin A. Yu., Gaisin I. G. et al. Method of planting, growing crops and selective felling with the harvesting of assortments by machines on artificially renewable forest areas. Patent RF, no. 2769472 C1, 2022. EDN: LKEXKM (In Russ.).
8. Denisov S. A., Shakirova Z. N. Influence of thermal conditions of creeping fire on viability of Scots pine seeds. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2017. No 4 (36). Pp. 35–47. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.35; EDN: YKYQXI (In Russ.).
9. Denisov S. A., Domracheva Z. N., Motova K. A. et al. The impact of fire in a vaccinium-type pine forest

on the germination and quality characteristics of pine seeds mortality. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2022. No 2 (54). Pp. 26–39. DOI: 10.25686/2306-2827.2022.2.26; EDN: UWBFUO (In Russ.).

10. Kalinin K. K. Large Forest fires in forest Middle Volga region and system management activities to eliminate their consequences: monograph. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2012. 364 p. EDN: TUMOXB (In Russ.).

11. Shirnin Yu. A., Gaisin I. G., Ryganova S. G. et al. Comparison and selection of performance variants of the elements of technological operations at work of the “harvester+forwarder” machine system. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest.*

Ecology. Nature Management. 2021. No 2 (50). Pp. 42–51. DOI: 10.25686/2306-2827.2021.2.42; EDN: SAZTZB (In Russ.).

12. Shirnin Yu. A., Shirnin A. Yu., Denisov S. A. et al. Developing burnt forest areas affected by ground fires with a “harvester+forwarder” machine system. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2022. No 2 (54). Pp. 55–63. DOI: 10.25686/2306-2827.2022.2.55; EDN: DPGXCY (In Russ.).

13. Shirnin Yu. A., Shirnin A. Yu., Denisov S. A. et al. Method for harvesting assortments by manipulator-type machines in forest areas affected by ground fires with ensuring natural regeneration of pine. Patent RF, no. 2781950 C1, 2022. EDN: OQMXFI (In Russ.).

The article was submitted 19.01.2024; approved after reviewing 18.03.2024; accepted for publication 27.03.2024

For citation: Shirnin Yu. A., Shirnin A. Yu., Denisov S. A., Petukhov I. V., Anisimov P. N. Justification of the Technology of Logging Operations Promoting the Natural Regeneration of Pine in Burnt Areas. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024. № 1 (61). Pp. 66–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.66>; EDN: XGUBTS

Information about the authors

Yury A. Shirnin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of Forestry and Chemical Technologies, Volga State University of Technology. Research interests – modeling and optimization of the technological parameters of logging, efficiency of the technological processes of logging. Author of 300 scientific publications. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4509-1324>; SPIN: 4947-2182

Aleksandr Y. Shirnin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Life Safety, Volga State University of Technology. Research interests – modeling and optimization of the technological parameters of logging, efficiency of the technological processes of logging. Author of 60 scientific publications. SPIN: 7890-5335

Sergei A. Denisov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Chair of Forestry and Forest Management, Volga State University of Technology. Research interests – silviculture, forestry, forest pyrology. Author of 150 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8805-1253>; SPIN: 9711-7130

Igor V. Petukhov – Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Chair of Design and Production of Computing Systems, Volga State University of Technology. Research interests – data mining, human-machine systems, automatic control. Author of 160 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>; SPIN: 6009-1846

Pavel N. Anisimov – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Chair of Enterprises Power Supply, Volga State University of Technology. Research interests – the technology of logging and wood processing industries. Author of 80 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7789-2399>; SPIN: 9087-4940

Contribution of authors:

Shirnin Yu. A. – research methodology, preparation of the initial draft.

Shirnin A. Yu. – preparation of research, patent search, processing of the time study materials.

Denisov S. A. – silvicultural justification, selection of objects, scientific consultation, preparation of the final version of the manuscript for publication.

Petukhov I. V. – reviewing and editing of the text, scientific consultation.

Anisimov P. N. – performing the experiments, analyzing the results obtained.

The authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 630.323.4:004

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.76>

EDN: YGQEPА

Программа по оптимизации схем раскроя древесного хлыста породы сосна на пиловочные брёвна

М. С. Асташевский[✉], А. А. Асташевская, М. А. Быковский

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Мытищинский филиал,
Российская Федерация, 141005, Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1
specret@yandex.ru [✉]

Введение. Процесс раскряжёвки древесного хлыста на сортименты является одной из основных технологических операций на лесозаготовках, определяющей объём и качество получаемой продукции из имеющегося древесного сырья на разрабатываемой лесосеке. Раскряжёвка хлыста на сортименты может выполняться как на лесосеке (сортиментная технология), так и на лесном складе (хлыстовая технология). Раскрой хлыста по первой технологии предполагает одноразовое получение ограниченного числа сортиментов из-за трудностей в их сборе, сортировке и транспортировке на лесосеке. Для хлыстовой технологии, при раскряжёвке хлыста в стационарных условиях, постоянное количество типоразмеров сортиментов приводит к изменению круглых сортиментов в сортиментном плане предприятия. **Цель** – разработать метод оптимизации раскряжёвки стволов сосны на сортименты, реализовать метод на языке программирования MATLAB для создания интерфейса программы, а также произвести имитационное моделирование процесса раскряжёвки для проверки адекватности модели. **Объект и методы.** Для исследования работы программы и анализа результатов было проведено имитационное моделирование раскроя 20 хлыстов с заранее обозначенным количеством выпиленных сортиментов. **Результаты.** Разработан метод оптимизации раскряжёвки древесного хлыста, основанный на критериях значимости сортимента в зависимости от диаметра в верхнем отрубе и длины сортимента, приведён интерфейс программы и рассмотрен порядок работы с программой. Обозначены необходимые исходные данные и режимы работы при взаимодействии с программой. **Выводы.** Оптимизация раскряжёвки хлыстов по определённым оценочным критериям, как показало данное исследование и опыт применения подобных программ на лесозаготовительных машинах, позволяет значительно повысить выход готовой продукции по ценностным и объёмным показателям. В то же время, для результативного использования программ оптимизации раскряжёвки необходимо получение подробной информации о форме и качестве отдельных деревьев древостоя и взаимодействие в работе с другими программными комплексами по управлению работой отдельных машин и технологического процесса лесозаготовок в целом. Эффективное использование отечественного оборудования лесной отрасли неразрывно связано с разработкой соответствующего программного обеспечения автоматического управления.

Ключевые слова: сортимент; лесные ресурсы; рационализация; имитационное моделирование

Введение. Процесс раскряжёвки древесного хлыста на сортименты является основной операцией на лесозаготовках, определяющей объём и качество получаемой продукции из имеющегося древесного сырья разрабатываемой лесосеки. Раскряжёвка хлыста на сортименты может вы-

полняться как на лесосеке (сортиментная технология), так и на лесном складе (хлыстовая технология). Раскрой хлыста по первой технологии предполагает одноразовое получение ограниченного числа сортиментов из-за трудностей в их сборе, сортировке и транспортировке на лесосеке.

© Асташевский М. С., Асташевская А. А., Быковский М. А., 2024

Для цитирования: Асташевский М. С., Асташевская А. А., Быковский М. А. Программа по оптимизации схем раскроя древесного хлыста породы сосна на пиловочные брёвна // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 1 (61). С. 76–84. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.76>; EDN: YGQEPА

Для хлыстовой технологии, при раскряжёвке хлыста в стационарных условиях, постоянное количество типоразмеров сортиментов, задаваемых оператором в зависимости от поставляемого сырья, приводит к изменению плана круглых сортиментов в сортиментном плане предприятия.

В настоящее время на территории Российской Федерации широко используется сортиментная технология заготовки древесины. Раскряжёвка древесного хлыста при такой технологии производится многооперационными лесозаготовительными машинами (харвестерами и процессорами) или вальщиком леса бензиномоторной пилой. Распространение сортиментной технологии обусловлено коротким производственным циклом, возможностью совмещать различные технологические операции и их элементы, достаточно быстрой реакцией на изменения потребностей рынка [1].

Важное значение программа по оптимизации раскряжёвки древесных хлыстов имеет для многооперационных машин, выполняющих комплекс операций по валке, обрезке сучьев и раскряжёвке, – харвестеров, которые должны оперативно выбирать схему раскроя в зависимости от породы и размера хлыста и поступающего заказа. Широкое применение системы машин харвестер и форвардер объясняется рядом положительных особенностей этой системы: сравнительно низкая энергоёмкость по сравнению с хлыстовой технологией, включающей не только лесозаготовительные машины, но и стационарное оборудование лесного склада, высокая экологичность по ряду параметров (сохранение подраста, относительно низкая повреждаемость почвы), высокая удельная производительность на человека. Технологическое оборудование харвестера (харвестерная головка) при современном развитии технологий и программного обеспечения позволяет выполнить качественную раскряжёвку хлыстов, точное соблюдение размеров (длину и диаметр) заказанных сортиментов, учёт заготовленных лесоматериалов. Программа оптимизации раскряжёвки для харвестера должна предусматривать выбор

схемы раскроя не только на основании размеров текущего хлыста, но и с учётом всей совокупности деревьев лесосеки и даже всех лесосек, назначенных в рубку в текущем году для данного предприятия. Это позволит обеспечить рациональный подход к использованию древесных ресурсов лесного фонда.

Вопросами по оптимизации раскряжёвки древесных хлыстов занимались многие учёные, среди них: А. К. Редькин, Б. Г. Залегаллер, В. И. Алябьев, В. А. Дорошенко, В. А. Лозовой, И. И. Гуслицер, В. С. Петровский, А. В. Никончук, А. С. Ледяева.

Программы по выбору рациональных схем раскроя хлыстов используются на харвестерах многих фирм-производителей лесозаготовительных машин: Ponsse (программный комплекс Opti4G), John Deere (программа TimberMatic), Kamatsu (программа MaxiXT) и др. Применение компьютерных программ и цифровых технологий позволяет в целом автоматизировать управление лесозаготовительной машиной и непосредственное выполнение технологических операций. Цифровизация древесных ресурсов эксплуатируемого лесного фонда при возможности оперативного доступа к массивам данных о разрабатываемой лесосеке делает возможным надёжный учёт заготавливаемого леса и эффективное управление лесозаготовками [2, 3].

В связи с этим, актуальность работы заключается в разработке компьютерной программы для лесозаготовительных машин по оптимизации раскряжёвки древесного хлыста с целью обеспечения рационального использования древесины. Критериями оптимизации в работе выбраны максимизация суммы коэффициентов значимости выпиленных сортиментов, которые устанавливаются на основании предпочтений заказчика к размерам сортиментов и в виде дополнительных параметров и ограничений, максимизация объёма сортиментов и длины пиловочной зоны. Кроме того, важным показателем рациональной схемы раскроя хлыста является минимизация кусковых отходов и вершинной части ствола.

Цель работы – разработать метод оптимизации раскряжёвки древесного хлыста на сортименты, реализовать метод на языке программирования MATLAB для создания интерфейса программы, а также произвести имитационное моделирование процесса раскряжёвки для проверки адекватности модели.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования в представленной работе являются схемы раскряжёвки древесных хлыстов и выбор оптимального варианта на основании указанных критериев: максимизации суммы коэффициентов значимости, объёмного выхода сортиментов и длины пиловочной зоны. Поиск оптимального варианта раскряжки хлыста основывается на составляемой матрице коэффициентов значимости по видам, размерам и породе сортиментов. К данной матрице предъявляется ряд требований. Комбинация и значения коэффициентов матрицы должны обеспечивать выпилровку требуемых видов сортиментов, должны учитываться размерные и качественные характеристики массива древесных хлыстов лесосеки, значения коэффициентов должны оперативно изменяться в процессе накопления выпиленных сортиментов.

В разработанной компьютерной программе по моделированию и оптимизации раскряжки хлыста набор возможных размеров выпиливаемых сортиментов основан на значениях длин и толщин, указанных в действующих стандартах на круглые лесоматериалы хвойных и лиственных пород. На основании стандартов длина сортиментов варьирует в диапазоне от 3 до 6,5 м с шагом 0,25 м. При наличии в раскряжываемом хлысте пороков и попадании их для конкретной схемы раскряжки в соответствующий сортимент сортность сортимента устанавливается также на основании действующего стандарта. Математическое описание формы хлыста, необходимое для расчёта размеров сортиментов, выполняется при помощи формулы проф. В. С. Петровского, которая содержит набор коэффициентов регрессии в зависимости

от породы древесины и условий произрастания древостоя. Расчёт коэффициентов регрессии выполнен с использованием данных замеров 150 хлыстов породы сосна. В таблице представлены вводные данные для проведения расчётов: диаметр ствола на высоте 1,3 метра « $d_{1,3}$ » в сантиметрах; диаметр ствола на половине длины ствола « d_2 » в сантиметрах; а также длина хлыстов « H » в метрах [5–7].

Вводные данные для имитационного моделирования

Input data for simulation modeling

$d_{1,3}$, см	d_2 , см	H , м
53,2	42,00	19,00
57,1	41,12	20,75
58,1	42,12	20,75
42,9	34,54	24,25
52,0	41,56	18,50
30,9	24,00	20,75
55,0	47,38	18,25
35,9	29,00	20,25
58,3	44,70	22,00
39,2	30,30	19,25
53,9	46,38	18,25
39,9	28,88	21,50
44,6	30,92	21,75
37,1	30,00	19,50
31,8	23,42	18,25
33,1	21,90	22,25
28,4	21,50	20,75
31,1	26,40	17,25
28,0	22,50	18,25
35,6	26,20	25,00

Программа для оптимизации раскряжёвки древесных хлыстов выполнена на языке программирования MATLAB, в которую подгружаются файлы Excel, содержащие экспериментальные данные размеров хлыстов, матрица коэффициентов значимости и другая исходная информация. Первый лист интерфейса программы, где делаются исходные установки и выполняется запуск расчёта, представлен на рис. 1.

Возможные схемы раскряжки хлыста, предлагаемые программой, представлены на рис. 2.

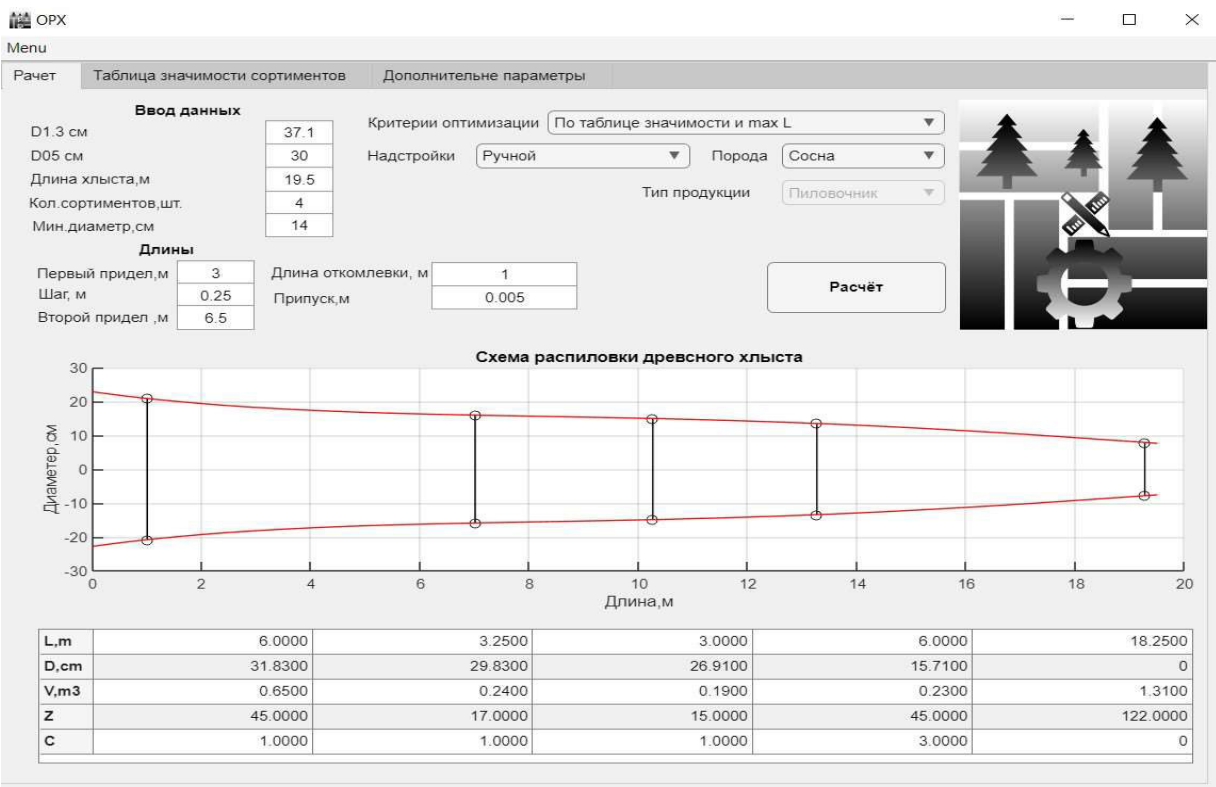


Рис. 1. Первый лист интерфейса программы
Fig. 1. The first sheet of the program interface

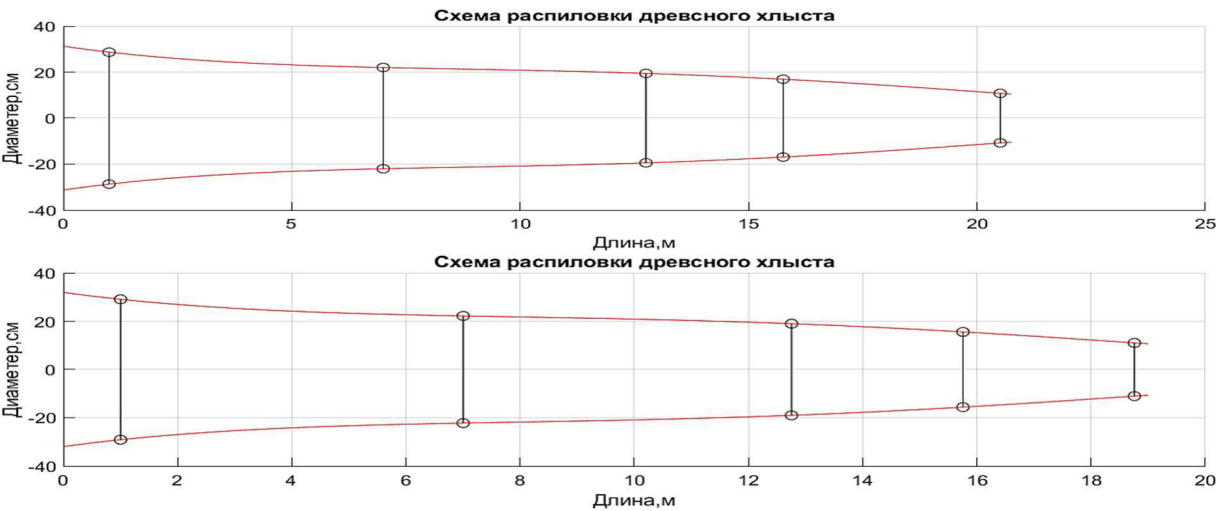


Рис. 2. Варианты предлагаемых схем раскря древесного хлыста
Fig. 2. Variants of the proposed patterns of cutting a tree length stem

Алгоритм работы программы включает несколько последовательных шагов.

Шаг 1 – ввод исходных данных и выбор режима (первая вкладка интерфейса). На этом шаге выбирается режим расчёта – ручной или автоматический, указывается порода, диаметр ствола дерева d на высоте 1,3 м, длина ствола H , диа-

метр на половине длины ствола $d_{1/2}$, минимальный диаметр ствола в сантиметрах, припуск по длине сортиментов, размер откомлёвки, минимальная и максимальная длины сортиментов и шаг варьирования сортиментов по длине. При выборе ручного режима дополнительно указывается количество выпиливаемых сортиментов.

Также на первой вкладке задаётся дополнительный критерий оптимизации – максимизация длины пиловочной зоны ствола или максимизация объёмного выхода сортиментов. На первом шаге выполняется загрузка исходной матрицы коэффициентов значимости сортиментов по длине и диаметрам, которая сформирована в электронных таблицах Excel.

Шаг 2 – функциональная работа программы. Непосредственная работа программы по расчёту вариантов раскроя хлыста и их оценки по критериям оптимизации начинается после нажатия клавиши «расчёт» на первой вкладке (рис. 1). Расчёт начинается с определения дополнительных параметров качества хлыста заданного размера: длины сучковой и бессучковой зон, среднего диаметра сучка и распределения значений диаметров сучков. На основании данных и места выпилки сортимента присваивается сортность данному сортименту. Далее происходит расчёт и формирование матрицы возможных вариантов раскроя хлыстов на сортименты, определяются размеры сортиментов по модели формы ствола, делается оценка возможной сортности по действующим стандартам и рассчитываются итоговые значения критериев оптимизации схем раскроя.

Шаг 3 – обработка и вывод результатов. Вывод схемы раскроя хлыста, полученного в результате работы программы оптимизации, производится в соответствии с выбранным дополнительным критерием (максимизация по суммарному объёму сортиментов или по длине пиловочной зоны). На основании данных выбранной схемы раскроя производится построение графиков и вывод параметров сортиментов: диаметров в верхнем и нижнем отрезе, длины, сорта, объёма, значимости в заказе. В программе существует возможность сохранения полученных данных по сортиментам и расчётных параметров раскраиваемого хлыста (объём, коэффициент формы, сбеги по длине) в таблице Excel.

Результаты и их обсуждение. На приведённой программе оптимизации раскроя было выполнено имитационное моделирование раскряжёвки 20 хлыстов с параметрами, представленными в таблице в ручном режиме. Моделирование выполнено двумя способами в соответствии с выбранным дополнительным критерием оптимизации. Припуск по ширине пропила был принят 2 см, а вид готовой продукции – пиловочные брёвна. Результаты имитационного моделирования по дополнительным критериям максимизации суммарного объёма сортиментов (первый способ) и максимизации по длине пиловочной зоны (второй способ) представлены на рис. 3.

По результатам имитационного моделирования для одной сформированной матрицы коэффициентов значимости отмечено предпочтение выбора более длинных сортиментов при раскряжёвке с дополнительным критерием максимизации длины пиловочной зоны и более коротких сортиментов при использовании критерия максимизации суммарного объёма сортиментов. Кроме того, при сравнении обычной раскряжёвкой на сортименты длиной 6 и 4 метра использование длины пиловочной зоны больше у схем, предложенных программой по сравнению с применяемыми схемами: 91 и 89 % соответственно. Использование объёма ствола дерева по предлагаемым программой схемам составляет 90 %, а для традиционно применяемых – 88 %.

Результаты моделирования по предложенной программе показывают, что внедрение автоматизированной системы управления технологическим процессом позволяет повысить выход готовой продукции на 2–3 % по цилиндрическому объёму древесины брёвен и на 3–15 % по ценностным показателям товарной продукции (по круглым лесоматериалам). Что также подтверждается научными трудами других авторов, таких как В. С. Петровский [8] и А. В. Никончук с соавт. [9].

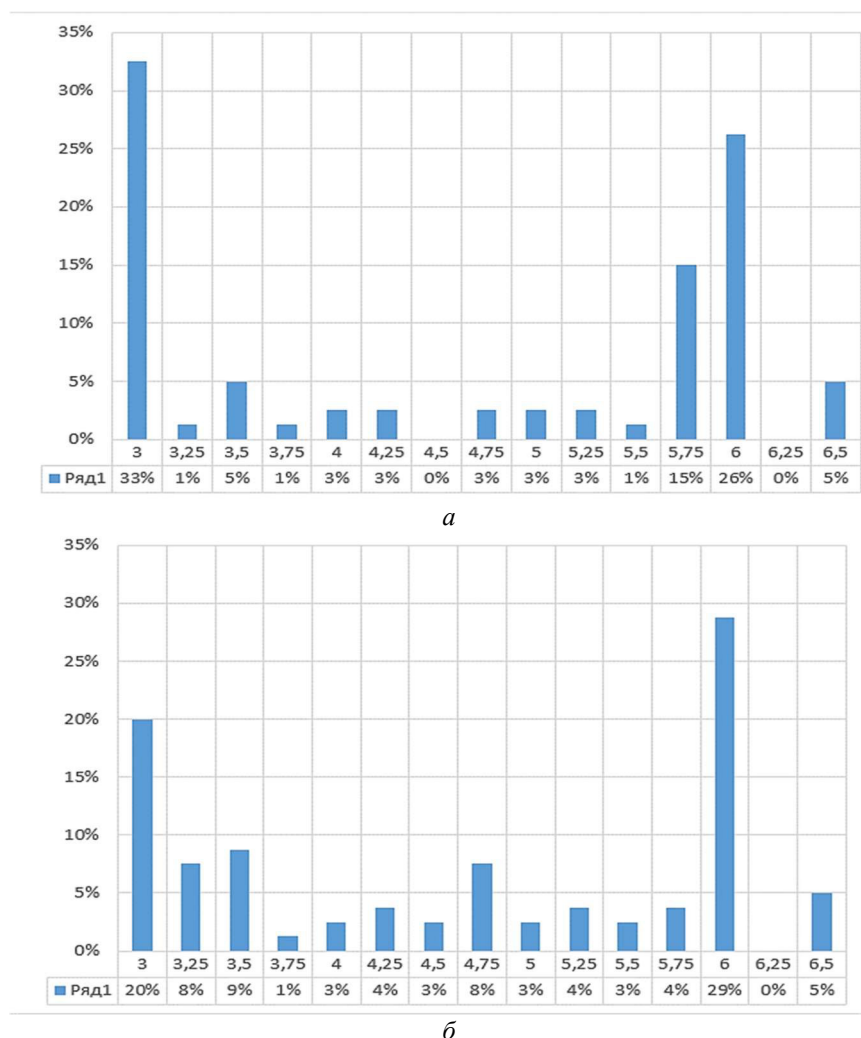


Рис. 3. Результаты моделирования раскряжёвки хлыста для ручного режима при максимизации суммарного объёма сортиментов (а) и максимизации по длине пиловочной зоны (б)
 Fig. 3. The results of modeling the tree length bucking for manual mode while maximizing the total volume of assortments (a) and maximizing the length of the sawing zone (b)

Вывод. Оптимизация раскряжёвки хлыстов по определённым оценочным критериям, как показало данное исследование и опыт применения подобных программ на лесозаготовительных машинах, позволяет значительно повысить выход готовой продукции по ценностным и объёмным показателям. В то же время, для результативного использования программ оптимизации раскряжёвки необходимо получение подробной ин-

формации о форме и качестве отдельных деревьев в древостое и взаимодействии в работе с другими программными комплексами по управлению работой отдельных машин и технологического процесса лесозаготовок в целом. Эффективное использование отечественного оборудования лесной отрасли неразрывно связано с разработкой соответствующего программного обеспечения автоматического управления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анучин А. С., Суханов Ю. В. К вопросу об оценке выхода деловой и дровяной древесины при механизированной сортиментной заготовке леса //

Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). Ст. 30. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2-y2017/4094> (дата обращения: 20.03.2023).

2. Асташевский М. С., Асташевская А. А. Цифровизация в лесном комплексе. Применение искусственного и машинного интеллекта в лесном комплексе // Материалы конференции «Машиностроение: новые концепции и технологии» (Красноярск, 28 октября 2022 г.). Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнёва, 2022. С. 17–19. EDN: MWPQJT

3. Stem-Level Bucking Pattern Optimization in Chainsaw Bucking Based on Terrestrial Laser Scanning Data / G. Erber, Ch. Gollob, R. Krassnitzer et al. // Croatian Journal of Forest Engineering. 2022. Vol. 43. Iss. 2. Pp. 287–301. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1596

4. Асташевский М. С., Асташевская А. А. Программа оптимизации схем раскряжки древесного хлыста // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023611635. Патентообладатель Асташевский М. С. Российская Федерация. Номер заявки № 2022686744; Заявл. 31.12.2022; Оpubл. 23.01.2023. EDN: KAMZDQ

5. Дорошенко В. А., Друк Л. В., Усачёв М. С. Выбор рациональных вариантов раскряжки древесного сырья в условиях технологических линий // Ак-

туальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 9 (35). С. 108–120. EDN: YLCKFA

6. Оптимизация процесса раскряжки хлыстов на лесоперевалочных базах лесных холдингов при выпиловке сырья для мачтопропиточных заводов / О. А. Куницкая, И. И. Тихонов, Д. Е. Куницкая и др. // Известия вузов. Лесной журнал. 2014. № 3 (339). С. 86–93. EDN: SEEOJZ

7. Тихонов И. И., Брагин Н. А. Автоматизированные системы оперативного управления процессом деления и раскряжки-раскряжки стволов деревьев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014. № 209. С. 198–211. EDN: TNABGP

8. Петровский В. С. Оптимальная раскряжка лесоматериалов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Лесная промышленность, 1989. 288 с.

9. Эффективность харвестерной технологии заготовки древесного сырья / А. В. Никончук, В. А. Лозовой, А. С. Крисько и др. // Хвойные бореальной зоны. 2018. Т. 36. № 1. С. 12–17. EDN: ХОКВРН

Статья поступила в редакцию 21.01.2024; одобрена после рецензирования 01.02.2024; принята к публикации 10.03.2024

Информация об авторах

АСТАШЕВСКИЙ Михаил Станиславович – аспирант кафедры ЛТ4 технологии и оборудование лесопромышленного производства, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Мытищинский филиал. Область научных интересов – технология лесосечных работ. Автор 21 научной публикации. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5325-6996>; SPIN-код: 4801-9045

АСТАШЕВСКАЯ Алина Александровна – инженер-конструктор, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Мытищинский филиал. Область научных интересов – технология лесосечных работ. Автор 23 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1175-6746>; SPIN-код: 4091-3113

БЫКОВСКИЙ Максим Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой ЛТ4 технологии и оборудование лесопромышленного производства, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Мытищинский филиал. Область научных интересов – технология лесосечных работ. Автор 80 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2539-7983>; SPIN-код: 9939-5039

Доступность данных и материалов: наборы данных, проанализированные в ходе исследования, являются общедоступными.

Вклад авторов:

Асташевский М. С. – разработка программы, разработка методики, выполнение экспериментальных работ, проверка данных, валидация, формальный анализ, полевые данные.

Асташевская А. А. – написание и подготовка статьи, визуализация.

Быковский М. А. – постановка цели, задач, руководство, редактирование.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 630.323.4:004

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.76>

EDN: YGQEP A

A Program for Optimizing the Patterns of Cutting Pine Tree Length Stems into Sawlogs

M. C. Astashevsky[✉], A. A. Astashevskaya, M. A. Bykovsky

Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University,
1, 1st Institutskaya St., Mytischki, Moscow region, 141005, Russian Federation
specret@yandex.ru[✉]

ABSTRACT

Introduction. In logging, the process of bucking tree length stems into assortments is one of the main technological operations that determines the volume and quality of the products obtained from the wood raw materials available. Bucking tree stems into assortments can be performed both at the logging site (cut-to-length technology) and at the landing (long-length technology). In compliance with the cut-to-length technology, tree length cutting involves one-time production of a limited number of assortments due to difficulties in their collection, sorting and transportation at the logging site. In the case of the long-length technology, the bucking a tree length stem occurs under stationary conditions, and a fixed number of assortment standard sizes leads to a change in round assortments in the assortment plan of the enterprise. **The purpose of the study** is to develop a method of optimizing the bucking of pine tree length stems into assortments, implement the method in the MATLAB programming language in order to create a program interface, and carry out simulation modeling of the bucking process to check the adequacy of the model. **Object and methods.** To study the software operations and analyze the results, the cutting of 20 tree length stems was simulated, the number of sawn logs being predefined. **Results.** A method of tree length bucking optimization has been developed based on the criteria of the assortment value depending on the assortment diameter in the upper cut and length; the program interface has been provided, and the procedure for working with the program has been considered. The input data and operating modes necessary for interacting with the software have been specified. **Conclusion.** The present study and the experience of using similar software on forest machines show that the optimization of tree length bucking according to certain evaluation criteria can significantly increase the yield of finished products in terms of value and volume indicators. At the same time, for effective application of the bucking optimization software, it is necessary to obtain detailed information on the shape and quality of individual trees in a forest stand, and to interact with other software systems designed to control the operation of individual machines and the technological process of logging as a whole. The effective use of domestic forestry equipment is inextricably linked with the development of appropriate automatic control software.

Keywords: assortment; forest resources; rationalization; simulation modeling

REFERENCES

1. Anuchin A. S., Suhanov Yu. V. To a question of an assessment of an exit of wood at the mechanized assortment harvesting. *Engineering Journal of Don*. 2017. No 2 (45). Art. 30. URL: <http://www.iv-don.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4094> (reference date: 20.03.2023). (In Russ.).
2. Astashevsky M. S., Astashevskaya A. A. Digitalization in the forest complex. Application of artificial and machine intelligence in the forest complex. *Mechanical Engineering: New Concepts and Technologies: conference proceedings (Krasnoyarsk, October 28, 2022)*. Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 2022. Pp. 17–19. EDN: MWPQJT (In Russ.).
3. Erber G., Gollob C., Krassnitzer R. et al. Stem-Level Bucking Pattern Optimization in Chainsaw Bucking Based on Terrestrial Laser Scanning Data. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2022. Vol. 43. Iss. 2. Pp. 287–301. DOI: 10.5552/crojfe.2022.1596
4. Astashevsky M. S., Astashevskaya A. A. Program for optimization of wood whip cutting schemes. *Certificate of state registration of a computer program, No. 2023611635*. Patent holder: Astashevsky M. S. Russian Federation. 2023. (In Russ.). EDN: KAMZDQ
5. Doroshenko V. A., Druk L. V., Usachev M. S. Choice of rational variants of cutting out of arboreal raw material in the conditions of technological lines. *Current Directions of Scientific Research of the XXI*

Century: Theory and Practice. 2017. Vol. 5. Iss. 9 (35). Pp. 108–120. EDN: YLCKFA (In Russ.).

6. Kunitskaya O. A., Tikhonov I. I., Kunitskaya D. E. et al. Optimization of tree length cross-cutting at timber-handling bases of forest holding companies when sawing out raw material for mast-impregnation plants. *Russian Forestry Journal*. 2014. No 3 (339). Pp. 86–93. EDN: SEEOJZ (In Russ.).

7. Tikhonov I. I., Bragin N. A. Automated process control system division and cutting bucking the

trunks of trees. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*. 2014. No 209. Pp. 198–211. EDN: TNABGP (In Russ.).

8. Petrovsky V. S. Optimal bucking of timber. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 288 p. (In Russ.).

9. Nikonchuk A. V., Lozovoi V. A., Crisco A. S. et al. The efficiency of harvesting processing technology of wood raw materials. *Conifers of the Boreal Area*. 2018. Vol. 36. Iss. 1. Pp. 12–17. EDN: XOKBPN (In Russ.).

The article was submitted 21.01.2024; approved after reviewing 01.02.2024; accepted for publication 10.03.2024

For citation: Astashevsky M. C., Astashevskaya A. A., Bykovsky M. A. A Program for Optimizing the Patterns of Cutting Pine Tree Length Stems into Sawlogs. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*. 2024. № 1 (61). Pp. 76–84. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.76>; EDN: YGQEP A

Information about the authors

Mikhail S. Astashevsky – Postgraduate student, Department LT4 – Technologies and Equipment of Timber Production, Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University. Research interests – technology of logging operations. Author of 21 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5325-6996>; SPIN: 4801-9045

Alina A. Astashevskaya – Design Engineer, Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University Bauman Moscow State Technical University. Research interests – technology of logging operations. Author of 23 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1175-6746>; SPIN: 4091-3113

Maxim A. Bykovsky – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, head of Department LT4 – Technologies and Equipment of Timber Production, Mytischki Branch of Bauman Moscow State Technical University Bauman Moscow State Technical University. Research interests – logging technology. Author of 80 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2539-7983>; SPIN: 9939-5039

Availability of data and materials: The datasets analyzed during the study are publicly available.

Contribution of the authors:

Astashevsky M.S. – software development, methodology development, experimental work, data verification, validation, formal analysis, field data.

Astashevskaya A.A. – writing and preparation of the article, visualization.

Bykovsky M. A. – setting research goals, objectives, supervision, reviewing and editing.

The authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

**ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ
И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ.
БИОТЕХНОЛОГИИ
PROBLEMS IN ECOLOGY AND RATIONAL NATURE
MANAGEMENT. BIOTECHNOLOGIES**

Scientific article

UDC 630:528.854

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.85>

EDN: YRDIYL

**Estimation of Cilician fir dendrometry variables in the Fir
and Cedar Reserve of Syria**

B. Tobo[✉], W. Ali, R. Karmoka, A. Mahmoud

Agricultural Research Center,
215, Buga St., Tishreen suburb, Latakia, 424079, Syria
bashar.tobo@Tishreen.edu.sy[✉]

Introduction. The Mediterranean forests provide wide range of social and economic benefits for the local communities. This is especially true for Syrian forests, which are under influence of the crisis that the country suffered from. In this respect, there is need in more precise technologies for forest inventory and monitoring for sustainable forest management. **The aim of the research** is to determine the woody production and growth characteristics of Cilician fir (*Abies cilicica*) trees that are found in the Latakia Governorate's Fir and Cedars Reserve of Syria. **The object of research.** Shuh forest is located in the northern part of the Syrian coastal mountain range, on the western slope of the summit of Jabal Al-Nabi Matta. **Research methods.** Within the research, remote sensing technology and Sentinel image processing were employed to estimate some forest growth factors, where maps were produced expressing growth factors through multiple regression analyses between sample location variables and corresponding pixel values for all ratios and indicators used. **Results and conclusions.** All the studied variables showed a significant correlation R that exceeded 0.75 with the wood stock, while the response to the density was lower as it did not exceed the value of 0.33 despite it being significant. The maps of the variables were produced using the derived regression equation for each indicator. The highest accuracy for the wood stock was 77 and 72 % for the average height. As for the estimated accuracy of the model, the average value of the deviation of the values of the variables estimated by the formula from the field measured was 6.08; 9.1; 9.6 and 8–12 % for models estimating the average height, average diameter, wood stock, and base area, respectively.

Keywords: *Abies Cilicica*; Fir and Cedar reserve; wood productivity; mean annual increment; exposure; Syria; growth factors; Sentinel

Acknowledgments: the authors are grateful to the anonymous reviewers for their valuable feed-back and guidance in improving the initial version of this manuscript in multiple ways. Also for Tishreen university, General Organization of Remote Sensing and the General commission of agricultural scientific research, for all the support they provided to complete this research.

Funding: the reported study was funded in the framework of scientific research and the preparation of databases in Syria, especially for important and endangered forest species.

© Tobo B., Ali W., Karmoka R., Mahmoud A., 2024

For citation: Tobo B., Ali W., Karmoka R., Mahmoud A. Estimation of Cilician fir dendrometry variables in the Fir and Cedar Reserve of Syria. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024. № 1 (61). Pp. 85–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.85>; EDN: YRDIYL

Introduction. The Mediterranean biome covers about 20 % of the Earth's surface. Of the five Mediterranean climate zones worldwide, the Mediterranean Basin constitutes the largest domain with about 25,000 plant species, more than half of which are endemic [1]. The forest wealth in Syria constitutes a unique natural heritage in terms of biodiversity and genetic diversity [2]. The area of forests in Syria is 527,494 ha, equivalent to (2.5 %) of the country's area, of which natural forests constitute 232,840 ha, while industrial forests occupy an area of 294,654 ha [3]. The Mediterranean forests play an important social and economic role by providing wood and non-wood forest products [4].

Sustainably produced wood and paper goods are a wise, renewable, and environmentally friendly choice compared to other materials such as plastic, which alone uses 4 % of the world's total oil production. Similarly, energy production from wood and forest-based biomass can displace other greenhouse gas-emitting products, such as oil and coal [5]. The study of forest growth is necessary to determine the breeding methods necessary to achieve the quantitative and qualitative specifications required for the produced wood, the cutting cycle system and the quantities of wood to be invested [6]. And to secure wood production in the best possible conditions while preserving the fertility of the site and the balance of forest groups. It expresses the productivity of a site, which is defined as the volume of wood produced by a certain forest group at a certain age taken as a reference or the average annual growth of this group at this age [7] about the fertility of this site and related to the common action of several factors interacting with each other, which can be divided into two main groups: the first group is related to the forest site itself and its degree of fertility, while the second group is related to the composition and structure of the forest group and the breeding processes applied in it, in addition to the human activity that may affect forest productivity positively or negatively. Accordingly, the productivity of a site results from the interaction of these factors combined, as one factor

alone cannot give an accurate idea of this productivity. The dynamic nature of forest productivity, which makes it variable according to many factors, requires the forester to consider this in the organization and management plans and through the comprehensive review and evaluation of these plans while trying to maintain and increase this productivity over time [8].

Sustainable development and rational use of forest resources are the basis for integrated management of forest resources, which relies on correct information periodically and within limited time periods about their spatial distribution and growth parameters such as phytomass, density, and woody stock, which is difficult to achieve periodically through traditional methods, which makes use of remote sensing technologies. Satellite data and geographic information systems (GIS) are the best method with their reasonable cost and acceptable accuracy of results, in addition to the high temporal recurrence of their data, the comprehensive vision they provide, and the effort that can be made to estimate the growth coefficients of the site [9, 10]. Many studies have also been conducted to estimate the density and coverage of forests in national parks and areas covered by extensive forests [11, 12].

The importance of the research

In light of the great changes that occurred in the Syrian forests and structure under the influence of the crisis that the country suffered from, it is necessary to go back again to enumerate the forest areas in Syria, especially in Latakia governorate, which is considered one of the richest Syrian governorates in forest wealth. There is need in additional study of the current reality of the most important forest species, especially those threatened with extinction, including the pure Cilician fir (*Abies cilicica*) communities in the Fir and Cedars Reserve in Slunfah. This research is also important in terms of establishment of the forestry database (diameters at breast height and wood stock) using traditional inventory processes in conjunction with the capabilities of analyzing Sentinel satellite images at the pixel

level. The research results can help those in charge of the forestry process to develop a preconception of integrated management plan for these forest groups and management process of the Syrian forests.

Purpose and objectives of the work

The aim of this research is to estimate the growth and wood yield of Cilician fir trees located in the Fir and Cedar Reserve in Lattakia Governorate and to establish a database of dendrometry indexes (diameters, heights, and wood stocks) using traditional inventories. Achieving this goal required solving the following tasks:

- Carry out field research with the establishment of test plots in forest stands in the study area in 2020.
- Analyse and process the satellite image Sentinel-2B.
- Produce maps expressing growth variables through multiple regression.

Assess the accuracy of the resulting thematic maps.

Study area

Shuh (fir) forest is located in the northern part of the Syrian coastal mountain range, on the western slope of the summit of Al-Nabi Matta, at altitudes ranging from 1200–1570 m above sea level, between Bab Jannah, the village of Al-Shouh, and the TV station in Lattakia Governorate, with an area of 978 ha [13] (Fig. 1). The forest lands are characterized by

steep slopes ranging from 20 to 27 degrees. It is dotted with cracked calcareous and dolomitic rocks from the Cretaceous era, covered with Mediterranean red soil. Under the conditions of forest vegetation, climatic factors and topography, they developed into forest soils. At higher elevations, soils that are very rich in undecomposed organic matter, called carbonaceous humic soils, develop. At lower elevations, the soil of the Mediterranean brown forest develops [14]. The study area enjoys a Mediterranean climate characterized by rainy winters, in which rain falls in the form of heavy and short-term showers. The summer is hot and dry. The annual average of precipitation is 1,400 mm, with some snowfalls whose annual average exceeds three days and may reach ten days with the increase in altitude. The average minimum temperature during January is 0.76 degrees Celsius, and the average maximum temperature during August is 23.9 degrees Celsius [14].

Materials and Methods

Satellite images and maps. For the research we used a Sentinel 2B image (spatial resolution 10 m) on 05.05.2020 at the time of the field surveys, SRTM data to extract terrain Data (elevation, Slope, and aspect), and topographical maps of 1:50000 scales to infer urban areas and Road network. The processing and output of satellite images were carried out using ERDAS Imagine and Arc GIS software.

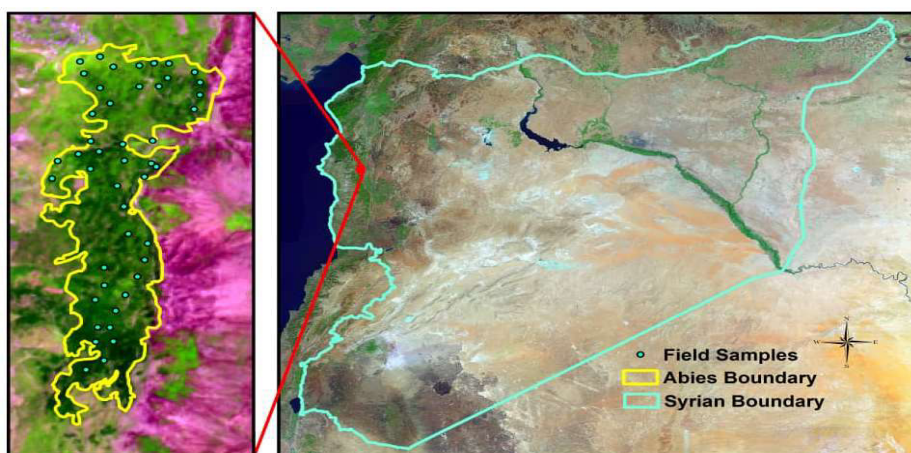


Fig. 1. Map showing the nucleus of the Fir and Cedar reserves in the Syrian coastal mountain range. The points within the nucleus of the reserve indicate the centres of the excised samples in the study area

Рис. 1. Карта, на которой показано ядро заповедника «Пихта и кедр» в Сирийском прибрежном горном массиве. Точками внутри заповедного ядра обозначены центры выделенных участков на исследуемой территории

Sampling. 46 circular samples of an area of 400 m² each with a radius of 11.3 m were taken in 2020. The samples were distributed over five different aspects to include most of the discrepancies that exist between aspects in the study area, namely: the western (11 samples), the eastern (8 checks), the northern (6 checks), the northwestern (7 checks), and the southwestern (14 checks). Knowing that the age of the trees in the forest was estimated using the Pressler probe, the average age of the trees was 118 years. The diameters of all the trees in the sample were measured at breast height (1.3 m) using a caliper. A Blume-Leiss dendrometer was used to measure the tree height, a GPS device was used to locate the sample coordinates and take their coordinate points, and spray paint of different colours were used to mark the measured trees and centre of samples.

Estimation of wood growth and productivity. To determine the indicators of growth and productivity of Shuh trees in the studied site, we measured a number of forestry parameters in all the study samples. The total number of trees measured in all samples was 1,239, and the variables measured in the samples included the number of trees in the sample (n), diameter DBH (1.3 m), full height H (m) for all sample trees from ground level to the top of the tree, and the average value of each indicator was calculated at the level of the forest group or site.

All trees in the sample with a diameter exceeding 10 cm at breast height were counted. **Tree density** was calculated according to the equation:

$$N = \sum n/A \text{ (tree/ha)}, \quad (1)$$

where N – number of trees in ha (tree/ha), n – the number of trees in the sample (tree), A – sample area (ha).

The **basal area** of each of the sample trees was calculated according to the equation:

$$g_i = \pi \cdot dbh^2 / 4 \cdot 10000 \text{ (m}^2/\text{ha)}, \quad (2)$$

where g_i – the basal area of the i tree (m²).

Then, the basal area was calculated at the sample level by dividing it by the sample area (0.04 e) according to the following equation:

$$G = \sum g_i / A \text{ (m}^2/\text{ha)}, \quad (3)$$

where G – the basal area in ha (m²/ha), g_i – the basal area of the i tree (m²), A – sample area (ha).

The **wood stock** V_i (m³), was calculated for each sample tree according to the basic equation for calculating the standing tree volumes:

$$V_i = g_i \cdot h_i \cdot f_i \text{ (m}^3/\text{ha)}, \quad (4)$$

where V_i – the woody volume of tree i in m³, f_i – shape modulus of keloid fir trees ($f=0.5$), h_i – the height of tree i in m, g_i – the basal area of tree i (m²).

Then the wood stock was calculated at the sample level according to the following equation:

$$V = \sum V_i / A \text{ (m}^3/\text{ha)}, \quad (5)$$

where V – wood stock in hectares (m³/ha).

The following equation was applied to calculate the annual growth rate (m³/ha/year) for fir trees in the studied site.

$$MAI = V/T \text{ (m}^3/\text{ha/year)}, \quad (6)$$

where V – wood stock in hectares (m³/ha), MAI – annual growth rate (m³/ha/year), T – age (years).

Sensitive study. Principle Component Analysis and images of topographical parameters (Elevation, Slope, and Aspect) were used in research analyses.

Vegetation indices

Simple Ratio Vegetation Index (SVR):

$$SVR = NIR/R. \quad (7)$$

The simplest vegetation cover indicator is called the vegetation percentage index. Its value is close to 1 for targets of water and barren land. It increases for vegetation targets until it exceeds the value of 35 with an increase in the density of vegetation cover.

Normalized difference vegetation index (NDVI):

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R). \quad (8)$$

The numeric values of NDVI image pixels range from +1 to -1 and the bit values are always in the positive range [15].

Enhanced vegetation index (EVI)

It includes the blue spectral range in order to improve the effect of the atmosphere

and the effect of the canopy, and it interacts well with the physiology of the Vegetation cover and with the structure and composition of the crown [16]:

$$EVI=2.5*(NIR-R)/(NIR+6R-7.5BLUE+1). \quad (9)$$

Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

It is a modified NDVI vegetative index calibrated on the basis of the effect of soil reflectivity on the transmission of infrared and near-infrared radiation through the crowns of plants [16]:

$$SAVI=(NIR-R)/(NIR+R+L)*(1+L), \quad (10)$$

where L– Adjusted Factor, which is determined within the equation by the value (0.5).

Green Chlorophyll Index (GCI)

Used to estimate the chlorophyll content of plant leaves [17].

$$GCI=(NIR/Green)-1. \quad (11)$$

Principal Component Analysis (PCA) is a standard linear method for dimensionality reduction and feature extraction. Its aim is to convert the large amount of data that has scattered characteristics into data that contains the basic characteristics of the image. The first band contains the largest contrast ratio between information, and the latter contains noise as it contains the lowest contrast ratio [18].

Within the research, the basic component analysis was carried out on two levels:

- Direct image Band PCA six levels.

• Combined spectral indicators, which concentrates the derived data into a limited set of ranges and 6 levels of this derivation.

Using Arc GIS Software, a raster product were prepared that reflects the sites and data of the field surveys. The images Represent vegetation indices were derived, the Principal component analysis were performed, and then the pixel values corresponding to the sites of the field surveys were extracted from all derived indices and recorded and processed via ERDAS Imagine software environment. The SPSS program was used to study the correlation values (Table 1) between the growth coefficient data measured at the sample locations and the corresponding values from the ranges resulting from the derived spectral indices

The multiple linear regression method was used within the SPSS statistical analysis program to build a mathematical model for each of the growth parameters using the values of spectral vegetation indicators and principal components analysis with the values of field surveys for 33 randomly selected sites from the sample sites and left data for 13 sites to test the accuracy of the models. The step-wise regression method was used in the statistical analysis program SPSS to overcome the issue of identifying the most influential factors in the model [19] and to determine the most affecting the most fitting indices.

Table 1. Correlation coefficients between the values of the field surveys and their corresponding pixels from the image products

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между значениями, полученными в ходе полевых измерений, и соответствующими им пикселями на продуктах спутниковой съёмки

	Density	Basal area	Wood stock	Average diameters	Average heights
SVI	-0.279	0.632**	0.620**	0.632**	0.718**
PCA4 (image bands)	-0.137	-0.505*	-0.515*	-0.433	-0.380
PCA3 (Indices)	0.174	-0.572*	-0.576*	-0.585**	-0.578**
Elevation	-0.109	-0.532*	-0.518*	-0.489	-0.557*
Aspect	0.301*	0.670**	0.655**	0.659**	0.584**
** Correlation is significant at the 0.01 level					
* Correlation is significant at the 0.05 level					

Results and Discussion

According to distribution of Diameter and heights classes in the studied samples

It could be noted from Fig. 2 that the measured trees were distributed according to their diameters within five classes with a range of 16 cm between them, and the largest number of trees in the studied site belonged to the diameter classes (27.4–43.8–60.2) cm respectively.

It could be also follow up from Fig. 3 that the measured trees were distributed within five classes in terms of height, with a range of (6 m) between one row and the other. Most of the trees belong to the row of height (15–21–33), respectively. While the row of height 39 m accounted for the least number of trees.

Wood stock basic forestry parameters. The parameters (variables or coefficients) show the forestry parameters (variables that can be measured and change with time, such

as the DBH and the total height of trees) calculated for Cilician fir trees in the studied samples (Table 2). The highest value of the basal area and the wood stock was in the south-western aspect with a value of 70.4 m²/ha for the basal area and 883.8 m³/ha for the wood stock with a tree density of 487 trees/ha, followed by the western aspect with a value of 57.1 m²/ha for the basal area and 655.8 m³/ha for the wood stock with a tree density of 518 trees/ha. It was followed by the northwestern aspect with a value of 56.4 m²/ha for the basal area, a value of 651.4 m³/ha for wood stock, and a tree density of 529 trees/ha. While the lowest value was recorded for the basal area of 37.2 m²/ha and the wood stock of 374.8 m³/ha in the northern aspect with a tree density of 525 trees/ha, followed by the eastern aspect with a value of 34.8 m²/ha for the area and 358 m³/ha for the wood stock and a tree density of 514 trees/ha (Table 2).

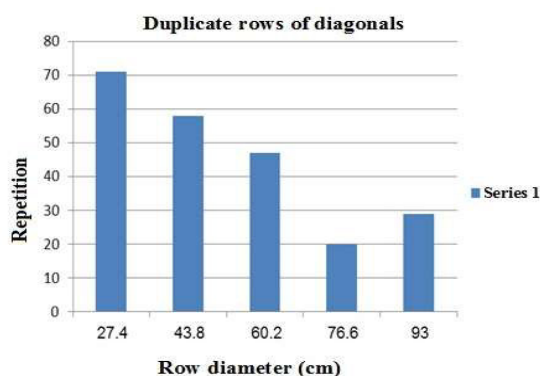


Fig. 2. Distribution of DBH in the studies samples

Рис. 2. Распределение деревьев по диаметру на высоте груди на исследуемых участках

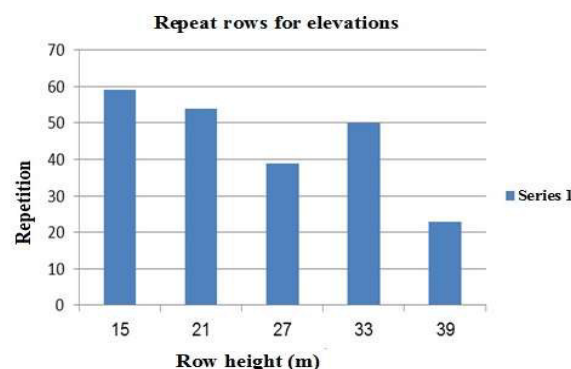


Fig. 3. Distribution of trees heights in the studies samples

Рис. 3. Распределение деревьев по высоте на исследуемых участках

Table 2. Basic forestry parameters calculated for trees of the studied species according to each gallery

Таблица 2. Основные таксационные показатели, рассчитанные для деревьев изучаемых пород по каждой галерее

Exposure	Plot Nr.	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)	N (tree/ha)	dbh average (cm)	H average (m)	MAL (m ³ /ha/year)
W	11	57.1	655.8	518	36	23	5.5
E	8	34.8	358.0	514	27	18	3.0
N	7	37.2	374.8	525	29	20	3.2
N.W	7	56.4	651.4	529	35	22	5.1
S.W	14	70.4	883.8	487	41	24	7.5

It is also noted from Table 2 that the values of the annual growth rate in each of the southwestern, western, and northwestern exhibitions exceed their counterparts in the eastern and northern exhibitions, where the annual growth rate achieved a value of 7.5 m³/ha/year in the southwestern exhibition, followed by the western exhibition with a value of 5.5 m³/ha/year, while the value of the annual growth rate in the northwestern exhibition was 5.1 m³/ha/year. The lowest value of the annual growth rate in the eastern and northern exhibits was 3.2 m³/ha/year in the northern exhibit and 3 m³/ha/year in the eastern exhibit. This is consistent with many studies on this species, including the study conducted by [20] to evaluate the growth of Kilikian fir seedlings planted under Turkey oak trees in the wet and sweet bioclimatic floor in the Syrian coastal mountains. The results of the study showed that the diagonal and longitudinal growth of trees was characterized by a slight increase in the first years of cultivation, which soon accelerated with the ageing of trees, to correspond with the evolutionary characteristics of shade types.

The study indicated that the density of fir was significantly higher than that of Turkey oak per unit area, and the average height of the studied fir trees was 14 m and their diameter at ground level was 4.2 cm. The average age of fir trees in our study was about 118 years. The value of the wood stock and the basal area differed from the values obtained. The study [21], showed that the average age of fir trees ranged between 30 and 40 years, the basal area was 22.08 m²/ha, and

the wood stock was 88 m³/ha, at an average height of 8 m, and an average diameter of 12 cm. This is due to difference in age and some of the characteristics of the site (soil, density). These values also differed from the values obtained by [22], where the wood stock of the forest group dominated by fir and mentioned by [22] was about 164 m³/ha (88 m³/ha with an average annual growth between 2.2–2.9 m³/ha for fir trees and 76 m³/ha with an average annual growth of 2 m³/ha for the fir tree) at a density of 955 trees/ha, for the same reasons as above, of different age, density, and some site characteristics.

Models for estimating growth coefficients by processing satellite images. The studied growth variables showed good and significant correlation values.

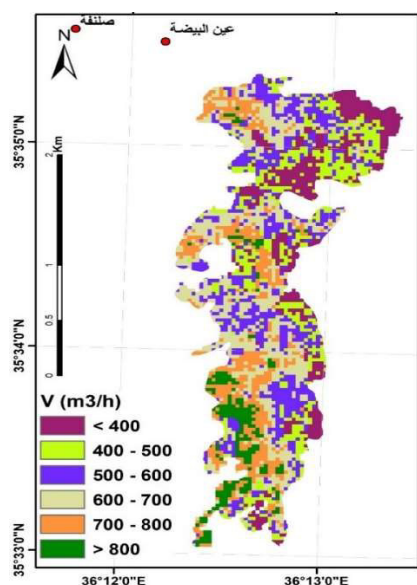
Tree density was only significantly correlated with the slope degree and had the lowest value among all correlation values, 0.339. The regression model that most expresses the changes in the values of the studied coefficients has been extracted According to the most fitting coefficients Table 3. The equations were applied to the Derived, and an accuracy test was implemented within the ERDAS program, and maps expressing the growth variables of the study area were produced (Fig. 4).

The growth variables were classified into classes, as shown in (Fig. 4), in order to improve their presentation and to enable verification of the suitability of the equation at the class level. The accuracy of the resulting image was estimated through an accuracy assessment within the ERDAS program using the data from 13 field verification sites (Table 4).

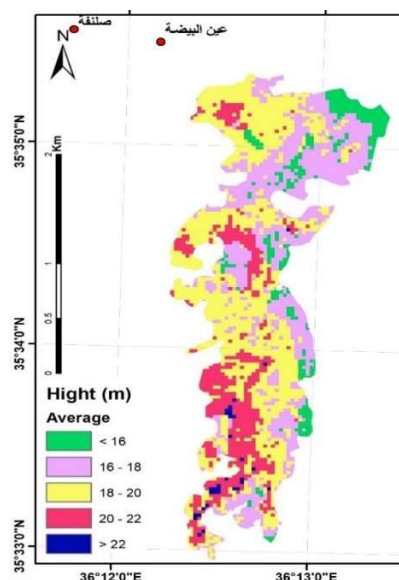
Table 3. Multiple regression equations for the studied growth coefficients (higher correlation values)

Таблица 3. Уравнения множественной регрессии для изучаемых коэффициентов роста (более высокие значения корреляции)

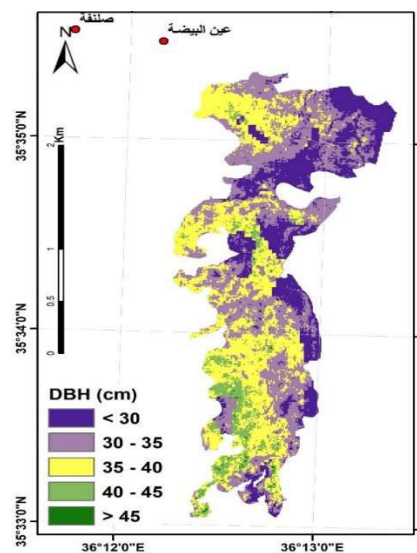
Growth coefficients	Regression equation	R	R2
Average heights	$= 32.3 + (2.4 * SVI) - (0.016 * Elevation) - (1.05 * PCA3_Indices) + (0.009 * Aspect)$	0.74	0.55
Average diameters	$= 65.4 + (0.03 * Aspect) - (2.8 * PCA3_Indices) - (0.03 * Elevation)$	0.70	0.49
Basal area	$= 152.4 + (0.06 * Aspect) - (7.82 * PCA3_Indices) - (0.09 * Elevation) - (0.02 * PCA4_image\ bands)$	0.75	0.57
Wooden stock	$= 2052 + (0.84 * Aspect) - (116.3 * PCA3_Indices) - (1.28 * Elevation) - (0.33 * PCA4_image\ bands)$	0.75	0.56
Tree density	$= 747.959 + (2.135 * Slope)$	0.33	0.11



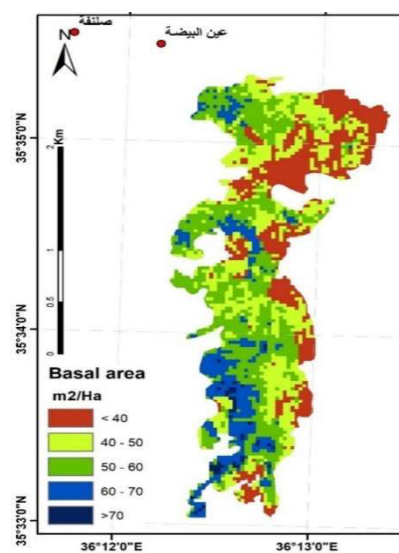
Wood stock map according to the mathematical model
Карта запасов древесины по математической модели



Average heights map according to the mathematical model
Карта средней высоты по математическим данным



Average diameter map according to the mathematical model
Карта среднего диаметра по математической модели



Basal area map according to the mathematical model
Карта прикорневой зоны по математической модели

Fig. 4. Growth coefficient maps
Рис. 4. Карты рядов коэффициентов роста

Table 4. The average deviation of the values of the estimated growth factors from the measured ones

Таблица 4. Среднее отклонение расчетных значений факторов роста от значений, полученных в ходе натурных измерений

Growth coefficients	Accuracy Assessment, %	The deviation of the estimated values from the measured ones	
		Average values of deviations	Ratio to the mean, %
Average heights	84	1.5m	11
Average diameters	82	3.8cm	12
Basal area	83	6.2m ²	7.8
Wooden stock	78	88m ³	14

Regression models included all equations used in the research. Performed based on terrain aspect, slope, and elevation data, due to the distribution of fir at different heights and directions. Aspect plays an important role in the presence and distribution of cilician fir, which prefers areas with high air humidity, such as the western slopes of the study area.

Also, in all equations, all indicators of natural vegetation were integrated as shown in the (PCA3_Index). As a result of the analysis, the variance in the studied coefficients was explained. The foregoing may explain the absence of individual vegetation indicators in the models for estimating the growth parameters of the fir forest, with the exception of the simple Vegetation index (in the average height model), which expresses in the simplest forms of spectral expressions of the vegetation cover. The contribution of the (PCA4_image bands) of the fourth order of the products of the analysis of the Principal component analysis of the basic bands of the image in the wood stock estimation model is also indicated.

The resulting maps reinforced the results obtained through field surveys in terms of the spatial distribution of the best growth condition. The areas expressing the classes of the highest wood stock values were concentrated in the southwestern parts of the forest, while the classes for the lowest values were concentrated within the values of the two parameters: the wood stock, and the basal area in the northern and north-eastern parts of the forest. As for the values of average heights and diameters, the data of heights and diameters were gotten in the field survey data at the

level of the single tree, while the application of the model is concerned with the average of the sample, i.e. the pixel level. It should be noted that this matter shows the importance of integration between field survey data and sensor products, and it lies in this case in the desired benefit from the use of sensor data and the possibility of interpolating data in locations other than the field survey sites, where each pixel is a sample site by itself, while the results of the field survey data constitute the data of the survey sample sites.

Conclusions

The results showed a significant relationship between the studied growth variables and the Sentinel-2 satellite image data, the results of the regression models for growth coefficients were close in terms of the value of the real field data. Therefore, we can conclude that a significant relationship can be detected between the growth parameters of the fir forest and their corresponding spectral reflectance values in the Sentinel-2 image. Thus, it is possible to prove the importance of the indicators used in the research to estimate these parameters, and to obtain accurate values at the level of row diameters, heights, basal area, and wood stock.

It was also revealed that the regression models for the growth coefficients were close in terms of the value of the correlation coefficient. In order to increase the accuracy values that were acquired, it could be possible to test images with a better spectral or spatial resolution. It would also be feasible to apply the temporarily distributed search (over a period of several years) to test the accuracy over time and evaluate growth rates and productivity.

REFERENCES / СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Médail F., Quezel P. Hot-Spots Analysis for Conservation of Plant Biodiversity in the Mediterranean Basin. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 1997. № 84. Pp. 112–127. DOI: 10.2307/2399957
2. Mouterde P. Nouvelle flore du Liban et de la Syrie. Beirut: Editions de l'Impr. Catholique, 1966.
3. Syrian Statistical Group. Ministry of Agriculture and Agrarian Reform, Directorate of Planning and International Cooperation Syria: Department of Statistics. 2018.
4. FAO and Plan Bleu. State of Mediterranean Forests 2018. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Plan Bleu, Marseille, 2018. 308 p. URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca2081en> (reference date: 10.09.2023).
5. FAO. Global Forest Resources Assessment 2020–Key findings. Rome, 2020. DOI: 10.4060/ca8753en
6. Zahwa S. Forest exploitation. Directorate of University Books and Publications, University of Aleppo: Syria. 1997.

7. Nahal I. *Pinus brutia* Ten. and its forests in Syria and the countries of the eastern Mediterranean. Directorate of University Books and Publications, Damascus, 1982. 228 p.
8. Abbas H., Shater Z. *Forest Organization and Management*. Tishreen University Publications, 2005, 320 p
9. Xu B., Gong P., Pu R. Crown closure estimation of oak savannah in a dry season with Landsat TM imagery: comparison of various indices through correlation analysis. *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol 24. Iss 9. Pp. 1811–1822. DOI: 10.1080/01431160210144598
10. Ripple W. J., Wang S., Isaacso D. L., Paine D. P. A Preliminary comparison of Landsat Thematic Mapper and SPOT-1 HRV multispectral data for estimating coniferous forest volume. *International Journal of Remote Sensing*. 1991. Vol. 12. Iss. 9. Pp. 1971–1977. DOI: 10.1080/01431169108955230
11. Hurcom S. J., Harrison A. R. The NDVI and spectral decomposition for semi-arid vegetation abundance estimation. *International Journal of Remote Sensing*. 1998. Vol. 19. Iss. 16. Pp. 3109–3125. DOI: 10.1080/014311698214217
12. Sivampillari R. C. Smith T., Srinivasan R. et al. Estimation of managed loboly pine stand age and density with Landsat ETM+ data. *Forest Ecology and management*. 2006. Vol. 223. Iss. 1–3. Pp. 247–255. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.11.013
13. Nahal I. *Encyclopedia of forest wealth in Syria (its past - present - future prospects)*. Publication of the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2012. 478 p.
14. Biodiversity Conservation and Nature Reserves Management Project (Sy-GE-57109). 2004. 168 p.
15. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Conference Paper. NASA. Goddard Space Flight Center. 3d ERTS-1 Symposium, 1973. Vol. 1, Sect. A. Pp. 309-317.
16. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of the Environment*. 1988. Vol. 25. Iss. 3. Pp. 295-309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X
17. Gitelson A., Gritz Y., Merzlyak M. Relationships between Leaf Chlorophyll Content and Spectral Reflectance and Algorithms for Non-Destructive Chlorophyll Assessment in Higher Plant Leaves. *Journal of Plant Physiology*. 2003. Vol. 160. Iss. 3. Pp. 271–282. DOI: 10.1078/0176-1617-00887
18. Jensen J. R. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1986. 379 p.
19. Royston P., Sauerbrei W. *Multivariable model-building: a pragmatic approach to regression analyses based on fractional polynomials for modelling continuous variables*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, England, 2008. 285 p.
20. Qabili I., Abbas H., Talal A. Study of the growth of the Kiliki fir plant under the semi-fringe oak in the humid and fresh bioclimatic floor of the Syrian coastal mountains. *Tishreen University Journal for Scientific Studies and Research – Agricultural Sciences Series*. 1996. Vol. 18. Iss. 4. Pp. 87–101.
21. Shalabi M. N. Natural forest and pastoral plant covers, and their qualitative and socio-plant components. In *vegetation, and soil conservation*. Aleppo University Publications. 1997. 341 p.
22. Martini G. An environmental study of a forest reserve allegedly established in Jabal al-Nabi Mat-ta (the Syrian coastal mountain range). A study prepared for a master's degree, Department of Renewable Natural Resources, College of Agriculture, University of Aleppo, and Syria. 1989. 164 p.

The article was submitted 16.10.2023; approved after reviewing 06.11.2023;
accepted for publication 27.12.2023

Information about the authors

Bashar Tobo – Candidate of Agricultural Sciences, Research Fellow at the Centre for Agricultural Research, Latakia, Syria. Research interests – remote sensing of forests and GIS, forest sciences and forest measurements. Author of six scientific publications.

Wael Ali – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Forestry, Faculty of Agriculture, University of Tishrin University, Latakia, Syria. Research interests – forest sciences and forest measurements. Author of 34 scientific publications.

Rosa Karmoka – Researcher, General Organization of Remote Sensing (GORS); Expert, the Arab Centre for the Study of Arid Zones and dry Lands (ACSAD), Damascus, Syria. Research interests – Management of Renewable natural resources and Environment. Author of 14 scientific publications.

Ahmed Mahmoud – Candidate of Agricultural Sciences, researcher, the Centre for Agricultural Research, Latakia, Syria. Research interests – Forestry and the environment. Author of seven scientific publications.

Availability of data and materials: the data presented in this study is available in the article. More information is available on request from the corresponding authors.

Contribution of the authors:

Bashar Tobo – conceptualization; methodology; software; validation; formal analysis; investigation; resources; data curation; writing – original draft preparation; writing – review and editing; visualization; supervision; project administration; funding acquisition.

Wael Ali – conceptualization; methodology; software; validation; formal analysis; investigation; resources; data curation; writing – original draft preparation; writing – review and editing; visualization; project administration; funding acquisition.

Rosa Karmoka – conceptualization; methodology; software; validation; formal analysis; resources; data curation; writing – original draft preparation; writing – review and editing; visualization; project administration; funding acquisition.

Ahmed Mahmoud – conceptualization; validation; visualization.

The authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 630:528.854

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.85>

EDN: YRDIYL

**Оценка таксационных показателей пихты киликийской
в заповеднике «Пихта и Кедр» в Сирии**

Б. Тобо[✉], В. Али, Р. Кармока, А. Махмуд

Центр сельскохозяйственных исследований,

Сирия, 424079, Латакия, пригород Тишрина, ул. Буга, 215

bashar.tobo@Tishreen.edu.sy [✉]

Введение. Средиземноморские леса обеспечивают местному населению широкий спектр социальных и экономических преимуществ. В частности, это справедливо в отношении лесов Сирии, находящихся под воздействием кризиса, от которого пострадала страна. В связи с этим существует потребность в более точных технологиях инвентаризации и мониторинга лесов для устойчивого управления лесами. **Цель исследования** – определение продуктивности и характеристик роста деревьев пихты киликийской (*Abies cilicica*), произрастающих в заповеднике «Пихта и Кедр» провинции Латакия в Сирии. **Объект исследования** – лес Шух, расположенный в северной части Сирийского прибрежного горного массива, на западном склоне горы Джебель ан-Наби Матта. **Методы исследования.** В ходе исследования были использованы технологии дистанционного зондирования и обработки снимков Sentinel с целью оценки некоторых факторов роста леса, для чего были составлены карты, определяющие факторы роста на основе множественного регрессионного анализа связи между переменными исследуемых участков и соответствующими значениями пикселей для всех используемых соотношений и показателей. **Результаты и выводы.** Все изученные переменные показали значимую корреляцию R , превышающую 0,75 по запасу древесины, при низкой реакции по плотности, не превышающей 0,33 несмотря на статистическую значимость. Карты рядов коэффициентов роста были составлены с использованием полученного уравнения регрессии для каждого показателя. Самая высокая точность оценки запаса древостоя составила 77 и 72 % для средней высоты. Что касается оценки точности модели, то среднее значение отклонения расчётных значений коэффициентов от полученных в ходе натурных измерений составило 6,08; 9,1; 9,6 и 8–12 % для моделей, оценивающих среднюю высоту, средний диаметр, запас древостоя и приростную зону, соответственно.

Ключевые слова: *Abies Cilicica*; заповедник «Пихта и Кедр»; продуктивность насаждения; среднегодовой прирост; воздействие; Сирия; факторы роста; Sentinel

Благодарности: авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за ценные отзывы и разнообразные рекомендации по улучшению первоначального варианта рукописи. Авторы также выражают признательность Тишринскому университету, Генеральной организации дистанционного зондирования и Генеральной комиссии научных исследований в области сельского хозяйства за поддержку, оказанную для выполнения этого исследования.

Финансирование: настоящее исследование финансировалось в рамках научно-исследовательской деятельности и подготовки баз данных в Сирии, особенно в отношении важных и находящихся под угрозой исчезновения лесных древесных пород.

Статья поступила в редакцию 16.10.2023; одобрена после рецензирования 06.11.2023;
принята к публикации 27.12.2023

Для цитирования: Тобо Б., Али В., Кармока Р., Махмуд А. Оценка таксационных показателей пихты киликийской в заповеднике «Пихта и Кедр» в Сирии // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 1 (61). Рр. 85–96. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.1.85>; EDN: YRDIYL

Информация об авторах

ТОБО Башар – кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, Центр сельскохозяйственных исследований. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС, науки о лесе и лесная таксация. Автор шести научных публикаций.

АЛИ Ваэль – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры экологии и лесного хозяйства, факультет сельского хозяйства, Тишринский университет. Область научных интересов – науки о лесе и лесная таксация. Автор 34 научных публикаций.

КАРМОКА Роза – научный сотрудник, Генеральная организация дистанционного зондирования (GORS); эксперт, Арабский центр аридных зон и засушливых земель (ACSAD). Область научных интересов – управление возобновляемыми природными ресурсами и окружающей средой. Автор 14 научных публикаций.

МАХМУД Ахмед – кандидат сельскохозяйственных наук, исследователь, Центр сельскохозяйственных исследований. Область научных интересов – лесное хозяйство и окружающая среда. Автор семи научных публикаций.

Доступность данных и материалов: данные, представленные в этом исследовании, доступны в статье. Более подробную информацию можно получить по запросу у автора, ответственного за переписку.

Вклад авторов:

Тобо Башар – концепция, методика, программное обеспечение, валидация, формальный анализ, исследование, ресурсы, проверка данных, написание статьи – подготовка исходного текста, написание статьи – чтение и редактирование, визуализация, руководство, администрирование проекта, финансирование.

Али Ваэль – концепция, методика, программное обеспечение, валидация, формальный анализ, исследование, ресурсы, проверка данных, написание статьи – подготовка исходного текста, написание статьи – чтение и редактирование, визуализация, администрирование проекта, финансирование.

Кармука Роза – концепция, методика, программное обеспечение, валидация, формальный анализ, ресурсы, проверка данных, написание статьи – подготовка исходного текста, написание статьи – чтение и редактирование, визуализация, администрирование проекта, финансирование.

Махмуд Ахмед – концепция, валидация, визуализация.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ДАТЫ. СОБЫТИЯ. КОММЕНТАРИИ DATES. EVENTS. COMMENTS

Комитет Совета Федерации
по аграрно-продовольственной политике и природопользованию
ПАРЛАМЕНТСКИЕ СЛУШАНИЯ
«Лесное семеноводство как основа интенсификации воспроизводства лесов»
Москва 14 декабря 2023 года, 10-00
Совет Федерации, Б. Дмитровка, 26

РЕКОМЕНДАЦИИ

Рассмотрев с участием сенаторов Российской Федерации, представителей федеральных органов исполнительной власти, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, научно-экспертного сообщества вопрос «Лесное семеноводство как основа интенсификации воспроизводства лесов», участники парламентских слушаний отмечают следующее.

Лесное семеноводство – одно из основных направлений лесохозяйственной деятельности, в задачу которого входит массовое производство семян лесных растений с ценными наследственными свойствами и высокими посевными качествами, их заготовка, обработка, хранение, реализация, транспортировка, использование, а также семенной контроль. Лесное семеноводство включает комплекс мероприятий по созданию и использованию постоянной лесосеменной базы на генетико-селекционной основе.

Постоянную лесосеменную базу составляют аттестованные лесные селекционно-семеноводческие объекты:

- лесосеменные плантации – специально создаваемые насаждения, предназначенные для массового получения в течение длительного времени ценных по наследственным свойствам семян лесных растений;

- постоянные лесосеменные участки – высокопродуктивные и высококачественные для данных лесорастительных условий участки насаждений или лесных культур известного происхождения, спе-

циально созданные (сформированные) для получения с них семян в течение длительного срока;

- плюсовые насаждения – самые высокопродуктивные, высококачественные и устойчивые для данных лесорастительных условий насаждения.

В промышленно развитых странах Европы (Германия, Швеция, Финляндия) от 40 до 90 % объёмов лесовосстановления обеспечивается семенами с улучшенными наследственными свойствами, что является основой высокой продуктивности и качества создаваемых насаждений. Например, в странах ЕС чистый годичный прирост древесины составляет 5,4 куб. м/га, что более чем в два раза выше аналогичных показателей Европейско-Уральской части России.

Российское лесное семеноводство опирается на колоссальные знания и опыт повышения количества и качества лесной продукции за счёт использования ценных в хозяйственном отношении популяций, отдельных генотипов («плюсовых деревьев»), клонов, сортов. Ещё в 70-е годы прошлого столетия в практику отечественного лесовосстановления пришли технологии получения посадочного материала лиственных и хвойных пород повышенной селекционной ценности. Во всех регионах были созданы лесосеменные плантации основных лесообразующих пород, площадь которых к 2005 году составила 7 887 га.

В настоящее время указанная работа прекращена, за последние десятилетия

потеряно 15 868 плюсовых деревьев, площадь лесосеменных плантаций сократилась до 6 000 га, то есть почти на 25 %.

Ситуация на селекционно-семеноводческих объектах (ССО) ухудшается вследствие старения деревьев и отсутствия лесоводственных уходов: созданные более 40–50 лет назад, они в силу возраста и высокой густоты снизили свою репродуктивную способность, а в ряде случаев прекратили семеношение. По информации Минприроды России, в 2022 году из 77,65 тонн заготовленных семян сосны, ели и лиственницы только 2,02 тонны, или 2,6 %, обладали улучшенными наследственными свойствами.

Следует отметить, что лесному семеноводству со стороны федеральных и региональных органов государственной власти уделяется недостаточное внимание. Имеются недостатки в части организации его функционирования, в том числе связанные с нормативным правовым регулированием.

Финансовое обеспечение семеноводства из федерального бюджета осуществляется по остаточному принципу. В 2023 году по сравнению с 2021 годом сократился объём субвенций на формирование запаса семян лесных растений – почти на 20 %. Основным источником финансирования этого направления – внебюджетные средства, доля федеральных расходов в 2021–2023 годах – не более 2 %. Также уменьшены объёмы субвенций на создание объектов лесного семеноводства, которые призваны обеспечивать воспроизводство лесов семенами с ценными наследственными свойствами – сокращение в 2023 году по сравнению с 2021 годом составило 6 %. На мероприятия по уходу за объектами лесного семеноводства за счёт средств федерального бюджета в 2021–2023 годах регионам доведено порядка 30 млн рублей, что обуславливает их проведение в недостаточных объёмах и низкую продуктивность.

К основным проблемным вопросам в части генетико-селекционного комплекса относятся: факты неиспользования

объектов лесного семеноводства для сбора семян, не проведение необходимого ухода за ними, а также недостаточная работа по созданию новых семеноводческих объектов взамен устаревших. Кроме того, остаются риски их утраты на территориях, переданных в аренду.

Строительство региональных селекционно-генетических центров по выращиванию контейнеризированных сеянцев и саженцев позволяет повысить объёмы выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой, однако их наличие без обеспеченности семенами с улучшенными наследственными свойствами не решает задачи повышения продуктивности лесов и устойчивости лесных насаждений к вредным организмам. В связи с чем участниками парламентских слушаний отмечена острая необходимость обеспечения селекционно-генетических центров улучшенными и сортовыми семенами основных лесообразующих пород.

Необходимо ускорить принятие федерального закона, обеспечивающего правовое регулирование производства семян лесных растений с ценными наследственными свойствами и высокими посевными качествами, их заготовку, обработку, хранение, реализацию, транспортировку, использование, семенной контроль, а также создание и использование постоянной лесосеменной базы на генетико-селекционной основе.

Для комплексного решения задачи устойчивого обеспечения воспроизводства лесов семенами лесных растений с ценными наследственными свойствами в первую очередь необходимы разработка и принятие федеральной и региональных программ сохранения и рационального использования генетических ресурсов, модернизация устаревших нормативных документов на все виды ССО и оптимизация организационной структуры этой наукоёмкой отрасли.

Особо приоритетными в сфере лесного семеноводства являются:

- увеличение объёмов работ по отбору плюсовых деревьев, созданию архивов

клонов, испытательных культур и закладке новых лесосеменных плантаций, лесосеменных плантаций повышенной генетической ценности и лесосеменных плантаций второго порядка, ускорение процесса лесной селекции с учётом научных достижений в данной области;

- повышение эффективности и скорости генетической оценки плюсовых деревьев в специальных испытательных культурах, объёмы закладки которых по предварительно усовершенствованным методикам должны быть увеличены в несколько раз;

- дальнейшее совершенствование и применение методов ранней диагностики генетически ценных деревьев и насаждений для ускорения сроков выведения сортов, перспективных для создания лесосеменных плантаций и получения генетически ценных семян;

- расширение исследований по разработке методов клонального микроразмножения *in vitro* и сохранения геномов ценных генотипов хвойных лесобразующих пород с целью ускоренного выведения сортов-клонов для создания лесосырьевых плантаций целевого назначения;

- отбор плюсовых насаждений и выделение среди них методами лесной генетики и селекции «элитных» популяций и создание на их основе ПЛСУ для получения сортовых семян в ускоренном порядке.

Субъекты Российской Федерации отмечают проблему недостаточного финансового обеспечения работ по уходу за лесосеменными плантациями, лесосеменными участками, архивами клонов, предусмотренных лесными планами, и, в связи с этим, сокращения их объёма и ухудшения качества.

По итогам состоявшихся парламентских слушаний принято решение:

1. Рекомендовать Правительству Российской Федерации:

1.1. С привлечением научного и экспертного сообщества ускорить разработку и внесение в Государственную Думу Федерального Собрания Российской Федерации проекта федерального закона, регулирующего отношения в области лесного се-

меноводства (производство семян лесных растений с ценными наследственными свойствами и высокими посевными качествами, их заготовку, обработку, хранение, реализацию, транспортировку, использование, семенной контроль, создание и использование постоянной лесосеменной базы на генетико-селекционной основе).

При доработке проекта федерального закона предусмотреть:

- развитие лесного селекционного семеноводства как наукоёмкой отрасли производства семян с улучшенными наследственными свойствами, предметом которой является: выявление и сохранение ценного для селекции генофонда лесных популяций и отдельных генотипов («плюсовых деревьев»);

- создание лесосеменных плантаций вегетативным потомством плюсовых и элитных деревьев, обладающих высокой продуктивностью, качеством стволовой древесины и устойчивостью к болезням;

- выведение сортов основных лесобразующих видов, предназначенных для создания быстрорастущих промышленных плантаций с ускоренным (сокращённым по времени) производственным циклом их эксплуатации;

- восстановление государственного управления объектами единого генетико-селекционного комплекса и формирование рынка улучшенных семян.

1.2. Разработать и реализовать программу сохранения и рационального использования генетических ресурсов, ставящую задачу доведения доли улучшенных, элитных и сортовых семян основных лесобразующих пород до оптимальных научно обоснованных для каждого региона значений.

1.3. Рассмотреть предложение о включении тематики лесной генетики и селекции в Федеральную научно-техническую программу развития генетических технологий на 2019–2030 годы, утверждённую постановлением Правительства Российской Федерации от 22.04.2019 № 479.

1.4. Рассмотреть вопрос увеличения финансового обеспечения создания и со-

держания объектов единого генетико-селекционного комплекса.

2. Рекомендовать Минприроды России, Рослесхозу рассмотреть предложения:

- дополнить пункты 4 и 5 Правил лесовосстановления, утверждённых приказом Минприроды России от 29.12.2021 № 1024, требованием о том, что используемые для посадки сеянцы или саженцы с закрытой корневой системой выращены с использованием семян с улучшенными селекционно-генетическими свойствами, а в пункте 43 указать на возможность снижения густоты посадки до 2 тысяч штук на 1 гектар лишь при применении данного вида посадочного материала;

- внедрить паспортизацию и сертификацию выращенного посадочного материала с классификацией сеянцев и саженцев как по селекционно-генетическим свойствам, так и морфобиометрическим показателям;

- исключить объекты лесного семеноводства из арендуемых площадей лесного фонда, провести генетическую паспортизацию потомств плюсовых деревьев в архивах клонов и на лесосеменных плантациях;

- восстановить научное сопровождение программ по созданию постоянной лесосеменной базы на генетико-селекционной основе;

- включить мероприятия по лесному семеноводству в национальный проект «Экология»;

- рассмотреть предложения по повышению эффективности установления границ лесосеменных районов с учётом научного обоснованного лесосеменного районирования;

- обеспечить региональные селекционно-генетические центры по выращиванию посадочного материала ЗКС улучшенными семенами основных лесообразующих пород;

- разработать нормативную правовую основу, регулирующую работы по реконструкции и замене объектов семеноводства;

- внести изменения в нормативные правовые акты в части разрешения вырубki минусовых деревьев в границах объектов лесного семеноводства, а также в целях защиты урожая на ЛСП от вредителей и болезней;

- доработать «Положения о выделении и сохранении генетического фонда древесных пород в лесах России», принятые в 1997 году;

- создать в пределах существующих особо охраняемых природных территорий объекты комплексной охраны сети генетических резерватов на основании научных обоснований с внесением соответствующих изменений в положения об особо охраняемых природных территориях;

- разработать правовые основы проведения химических уходов за объектами лесного семеноводства, особенно при защите урожая шишек и семян.

3. Рекомендовать Рослесхозу:

рассмотреть вопрос расширения перечня лесохозяйственной техники и оборудования, утверждённого приказом Рослесхоза от 29.07.2021 № 607, в целях включения необходимых механизмов для обеспечения возможности проведения сбора лесосеменного сырья на существующих объектах лесного семеноводства.

Подготовлено по материалам сайта Совета Федерации
Федерального Собрания Российской Федерации

URL: <http://council.gov.ru/activity/activities/parliamentary/152365/>

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Доводим до сведения авторов и читателей нашего журнала, что в соответствии с Приказом Минобрнауки России от 24.02.2021 № 118 «Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются учёные степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук, утверждённое приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093» (зарегистрировано в Минюсте России 06.04.2021 № 62998) изменились научные специальности и их паспорта.

С декабря 2022 года журнал «Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование» печатает статьи по обновлённым научным специальностям и соответствующим им отраслям науки в следующих рубриках:

Лесное хозяйство:

4.1. Агрономия, лесное и водное хозяйство:

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (сельскохозяйственные и биологические).

4.1.6. Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация (сельскохозяйственные, биологические и технические).

Технологии и машины лесного дела:

4.3. Агроинженерия и пищевые технологии:

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины (технические, биологические, химические).

Проблемы экологии и рационального природопользования:

1.6. Науки о Земле и окружающей среде:

1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия (географические).

1.6.21. Геоэкология (географические).

Даты, события, комментарии. По-прежнему будут размещаться материалы о знаменательных датах, конференциях и форумах с их резолюциями, о других событиях, а также рецензии на статьи и монографии.

Статья должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты завершённых исследований авторов, объёмом 8–15 страниц, включая рисунки.

К печати принимаются материалы, которые не опубликованы и не переданы в другие редакции. Рукописи проходят обязательное рецензирование. В «Вестнике...» печатаются только статьи, получившие положительные рецензии.

Требования к оригиналам предоставляемых работ

Структура научной статьи

1. Аннотация (3–4 предложения).
2. Ключевые слова или словосочетания (не более 10) отделяются друг от друга точкой с запятой.
3. Введение (оценка состояния вопроса, основанная на обзоре литературы с мотивацией актуальности; выявленное противоречие, позволяющее сформулировать проблемную ситуацию).
4. Цель работы, направленная на преодоление проблемной ситуации (1–2 предложения).
5. Решаемые задачи, направленные на достижение цели.
6. Математическое, аналитическое или иное моделирование.
7. Техника эксперимента и методика обработки или изложение иных полученных результатов.
8. Интерпретация результатов или их анализ.
9. Выводы, отражающие новизну полученных результатов, показывающих, что цель, поставленная в работе, достигнута.

Подробнее – на сайте ПГТУ: <http://journals.volgatech.net/?journal=forest>