

ВЕСТНИК

Поволжского государственного
технологического университета

ЛЕС

ЭКОЛОГИЯ

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ



2024



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

ВЕСТНИК

2(62)

2024

апрель – июнь

ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

СЕРИЯ «Лес. Экология. Природопользование»

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 28.06.24.

Формат 60×84 1/8. Усл. п. л. 12,09.

Тираж 500 экз. Заказ № 2406

Дата выхода в свет: 15.07.24.

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. Бессе́тнов, д-р биол. наук, профессор (Нижний Новгород)

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. Егошина, 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. Куролап, д-р геогр. наук, профессор (Воронеж)

Д. И. Мухортов, 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. Рукомои́ников, д-р техн. наук, доцент

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

Е. С. Шаратов, д-р техн. наук, доцент

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

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

VESTNIK

2(62)

2024

April – June

OF VOLGA STATE UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Series «**Forest. Ecology. Nature Management**»

Academic Periodical

Has been published since 11, 2007

Is issued 4 times a year

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, ULRICH'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 of the founder, publisher and editorial office:

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 28.06.24.

format 60×84 1/8. No. of press sheets 12,09

Printing run 500 copies. Order No 2406

Release date: 15.07.24.

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

Мухортков Д. И., Окач М. А., Майоров Н. Д. Обеззараживание субстратов при выращивании сеянцев древесных пород в контейнерах

Зонтиков Д. Н., Малахова К. В., Березина О. О. Влияние макроэлементного состава среды WPM и регуляторов роста на морфогенез вегетативных и генеративных тканей сортовых форм голубики

Котынова М. Ю., Ханявин А. И., Бессчётнова Н. Н., Бессчётнов В. П. Пигментный состав хвои декоративных форм и сортов туи западной (*Thuja occidentalis*) в условиях Нижегородской области

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

Краснова В. Ф., Краснов В. Г., Шарпов Е. С., Петухов И. В., Анисимов П. Н. Физико-механические свойства древесно-цементных композитов на основе отходов оцилиндровки брёвен

Бурмистрова О. Н., Кручинин И. Н., Клевеко В. И. Оценка напряжённо-деформированного состояния дорожной одежды лесных дорог, усиленной геосинтетическими оболочками

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ. БИОТЕХНОЛОГИИ

Ван И., Курбанов Э. А., Ша Д., Воробьёв О. Н., Ван Д., Дергунов Д. М. Оценка экологического состояния лесных экосистем коридора Хэси с использованием временных рядов индекса RSEI

Холопцев А. В. Изменения повторяемости сухих гроз при современном потеплении климата на примере некоторых районов Якутии и Красноярского края

ДАТЫ. СОБЫТИЯ. КОММЕНТАРИИ

Серебрякова Н. Е., Тимурғалиева Л. А. К 95-летию выдающегося учёного лесной науки и педагога Виктора Ильича Пчелина

Информация для авторов

CONTENTS

5 *Editor's note*

FORESTRY

Mukhortov D. I., Okach M. A., Mayorov N. D. Disinfection of Substrates for Growing Containerized Tree Seedlings

6

Zontikov D. N., Malakhova K. V., Berezina O. O. Influence of the Macroelement Composition of the WPM Medium and Growth Regulators on the Morphogenesis of Vegetative and Generative Tissues of Varietal Forms of *Vaccinium Angustifolium* Ait

20

Kotynova M. Y., Khanyavin A. I., Besschetnova N. N., Besschetnov V. P. Pigment Composition of the Needles of Decorative Forms and Varieties of Western Thuja (*Thuja Occidentalis*) in the Conditions of the Nizhny Novgorod Region

31

FORESTRY TECHNOLOGIES AND MACHINES

Krasnova V. F., Krasnov V. G., Sharapov E. S., Petukhov I. V., Anisimov P. N. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composites Based on Log Rounding Waste

46

Burmistrova O. N., Kruchinin I. N., Kleveko V. I. Assessment of the Stress-Strain State of the Forest Road Pavement Reinforced with Geosynthetic Shells

56

PROBLEMS IN ECOLOGY AND RATIONAL NATURE MANAGMENT. BIOTECHNOLOGIES

Wang Y., Kurbanov E. A., Sha J., Vorobyov O. N., Wang J., Dergunov D. M. Assessing the ecological health of Hexi corridor's forest ecosystem using RSEI time series

64

Kholoptsev A. V. Changes in the Recurrence of Dry Thunderstorms under Modern Climate Warming on the Example of Some Regions of Yakutia and Krasnoyarsk Krai

82

DATES. EVENTS. COMMENTS

Serebryakova N. E., Timurgaliev L. A. To the 95th anniversary of the outstanding forest scientist and educator Victor Ilyich Pchelin

98

104 *Information for the authors*

Уважаемые коллеги!

Представляем вашему вниманию очередной номер нашего журнала за 2024 год.

Раздел «Лесное хозяйство» открывает статья, в которой описано влияние электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) на обеззараживание субстратов при выращивании сеянцев сосны и ели в контейнерах. Установлено подавляющее и стимулирующее действие излучения при разных режимах обработки на микроорганизмы. При мощности излучения 200–450 Вт и продолжительности воздействия СВЧ от 4 до 8 минут в субстрате полностью отсутствовали всходы сорных растений. Оптимальным режимом стерилизации торфа ЭМП СВЧ является мощность 300 Вт и экспозиция облучения – 10 минут. Во второй статье приведено влияние макроэлементного состава среды WPM и регуляторов роста на морфогенез вегетативных и генеративных тканей сортовых форм голубики. Сделан вывод об особенностях активации переключения развития микроспор с гаметофитной на спорофитную программу у сортовых форм голубики узколистный в зависимости от концентрации макроэлементного состава среды. В следующей статье данного раздела приведена сравнительная оценка декоративных форм и сортов туи западной (*Thuja occidentalis*) в условиях Нижегородской области. Сорта и формы туи западной неоднородны по пигментному составу хвои. При этом он нестабилен и подвержен значительным изменениям в начале и конце вегетационного периода. При этом концентрация хлорофилла и каротиноидов в осенний период повышается.

В разделе «Технологии и машины лесного дела» представлены две статьи. В первой из них даётся характеристика физико-механических свойств древесных композиционных материалов с использованием отходов оцилиндровки бревен. Арболит, изготовленный из данных отходов, соответствует требованиям ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия». Во второй дана оценка напряжённо-деформированного состояния дорожной одежды лесных дорог, усиленной геосинтетическими оболочками. Предложенные конструкции дорожных одежд позволяют снизить их вертикальные деформации.

В разделе «Проблемы экологии и рационального природопользования» опубликованы две статьи. Первая посвящена оценке и прогнозу экологических тенденций состояния лесов по данным временных рядов спутниковых данных и нелинейных зависимостей. Анализ нелинейного моделирования с экологическими индексами позволяет получить важные сведения для будущих стратегий сохранения и управления лесными экосистемами, особенно в районе Хэси КНР. Во второй статье описываются выявленные тенденции повторяемости сухих гроз в летние месяцы для Якутии и Красноярского края. Они определяются не только вариациями местного климата, но и географическим положением изучаемых территорий. Существенное влияние на повторность сухих гроз предположительно оказывают ландшафтные факторы.

В разделе «Даты. События. Комментарии» размещена статья, посвящённая учёному-лесоводу, Почётному работнику высшего профессионального образования РФ, Заслуженному деятелю науки Республики Марий Эл, почётному профессору ПГТУ, Заслуженному лесоводу Российской Федерации Виктору Ильичу Пчелину.

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



Профессор Евгений Романов

Dear colleagues!

We present to your attention the new 2024 issue of our journal.

The section “Forestry” opens with an article that describes the influence of the ultrahigh frequency electromagnetic field (microwave EMF) on the disinfection of substrates when growing containerized pine and spruce seedlings. Both suppressive and stimulating effects of microwave radiation on microorganisms exposed to under different treatment modes were determined. The application of microwave radiation at a power of 200–450 W for 4–8 minutes resulted in the total absence of weed seedlings in the substrate. The optimal mode of peat sterilization via microwave irradiation is at the power level of 300 W with the exposure time of 10 minutes. The second article considers the effect of the WPM macroelement composition and growth regulators on the morphogenesis of vegetative and generative tissues in varietal forms of blueberry. The study revealed the specific features of activating the switch of the microspore development from the gametophytic to the sporophytic program in the varietal forms of *Vaccinium angustifolium* Aiton depending on the concentrations of macroelements in the medium composition. The final article in this section provides a comparative assessment of several decorative forms and varieties of Western thuja (*Thuja occidentalis*) in the conditions of the Nizhny Novgorod region. The varieties and forms of *Thuja occidentalis* are heterogeneous in terms of needle pigment composition which is unstable and subject to significant changes at the beginning and at the end of the growing season. Furthermore, the concentration of chlorophyll and carotenoids increases in autumn.

The section “Forestry Technologies and Machines” features two articles. The first deals with characteristics of the physical and mechanical properties of wood composite materials and the use of log rounding waste. Arbolite made from this waste meets the requirements of the GOST 19222-2019 standard “Arbolite and its products. Specifications”. The second article focuses on the assessment of the stress-strain state of the forest road pavements reinforced with geosynthetic shells. The proposed road pavement designs make it possible to reduce their vertical deformations.

Two articles are published in the section “Problems of Ecology and Rational Nature Management”. The first one is devoted to assessing and forecasting the environmental trends in the state of forests based on time series of satellite data and nonlinear dependencies. The combination of nonlinear model analysis with environmental indices provides crucial insights for future conservation and management strategies, especially in the Hexi Corridor, China. The second article describes the trends identified in the recurrence of dry thunderstorms during summer months in Yakutia and Krasnoyarsk Krai. The trends are determined not only by variations of the local climate, but also by the geographical location of the studied territories. It is presumed that landscape factors have a significant influence on the frequency of dry thunderstorm events.

The section “Dates. Events. Comments” includes an article dedicated to Victor Ilyich Pchelin, forest scientist, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honored Scientist of the Republic of Mari El, Honorary Professor of Volga State University of Technology, and Honored Forester of the Russian Federation

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*232.422

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.6>

EDN: QBEZNM

Обеззараживание субстратов при выращивании сеянцев древесных пород в контейнерах

Д. И. Мухортов[✉], М. А. Окач, Н. Д. Майоров

Поволжский государственный технологический университет,

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

MuhortovDI@volgatech.net[✉]

Аннотация. *Введение.* Получение стандартного лесного посадочного материала с закрытой корневой системой предполагает использование при его выращивании качественного тепличного субстрата, который характеризуется оптимальными физико-химическими свойствами, отсутствием семян сорной растительности и патогенной микрофлоры. В качестве альтернативного способа обеззараживания предлагается использовать электромагнитные поля сверхвысокой частоты. *Цель работы* – определить эффективный режим обеззараживания корнезакрывающего субстрата в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ). *Объектом* исследования был низинный торф с включёнными в его состав семенами сорных растений. В ходе эксперимента был проведён количественный анализ колониеобразующих единиц микроорганизмов в торфе, изучены всхожесть семян сорной растительности и биометрические параметры сеянцев сосны обыкновенной и ели европейской. Проанализировано воздействие СВЧ-излучения на изменение температуры и массы торфа. *Результаты.* Анализ изменения температуры нагрева торфа от режима СВЧ-излучения показал, что интенсивность нагрева торфа зависит от мощности излучения и временной экспозиции. Эффективные температуры разогрева в 100–120 °С отмечались при мощностях 600–800 Вт с длительностью обработки в диапазоне 8–10 минут, а также при 450 Вт с десятиминутным облучением. Минимальные потери массы торфа под воздействием СВЧ-излучения наблюдались при режимах мощности от 300–450 Вт при экспозиции 10 минут. Изучение воздействия СВЧ-полей на микроорганизмы выявило подавляющее и стимулирующее действие излучения при различных режимах обработки. Анализ результатов эксперимента по влиянию режимов СВЧ-излучения на всхожесть семян сорных растений показал полное отсутствие всходов при режиме мощности излучения 200–450 Вт и продолжительности воздействия СВЧ от 4–8 минут. У сеянцев сосны обыкновенной, выращенных на торфе после обеззараживания СВЧ-излучением, отмечалось увеличение массы сеянцев по сравнению с контролем. У сеянцев ели европейской снижалась энергия прорастания семян и достоверно повышался показатель диаметра стволиков у корневой шейки. *Выводы.* Оптимальным режимом стерилизации торфа СВЧ-излучением являлась мощность 300 Вт и временная экспозиция облучения – 10 минут. Определены режимы СВЧ-излучения, ингибирующие прорастание семян. Обеззараживание торфа СВЧ-излучением положительно влияет на массу сеянцев сосны обыкновенной и снижает процент энергии прорастания семян ели европейской.

Ключевые слова: лесопосадочный материал; корнезакрывающий субстрат; электромагнитное поле сверхвысокой частоты; эффективная температура разогрева; микроорганизмы; семена сорной растительности

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Мухортов Д. И., Окач М. А., Майоров Н. Д. Обеззараживание субстратов при выращивании сеянцев древесных пород в контейнерах // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 6–19. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.6>; EDN: QBEZNM

© Мухортов Д. И., Окач М. А., Майоров Н. Д., 2024

Введение

В настоящее время в лесном хозяйстве Российской Федерации значительно возрос интерес к выращиванию сеянцев с закрытой корневой системой. Важным фактором, определяющим биометрические параметры растений в условиях ограниченного объёма корнезакрывающего субстрата, является его качество [1]. Традиционно основой субстратов для выращивания растений в контейнерах является торф, модифицированный комплексом минеральных добавок, смачивателей и разрыхлителей. Субстраты, предназначенные для выращивания растений в условиях закрытого грунта, должны обладать определёнными агрофизическими, агрохимическими и биологическими показателями. К биологическим свойствам корнезакрывающих субстратов относят отсутствие патогенных микроорганизмов [2] и семян сорной растительности [3]. В условиях контролируемого микроклимата необходимо уделять особое внимание биологическим свойствам субстратов, это поможет снизить экономические затраты на уход и предотвратить потери сеянцев от инфекционных заболеваний. В настоящее время распространёнными способами дезинфекции корнезакрывающих субстратов является обработка водяным паром и высокими температурами [4]. Энергетически и технически данные способы обеззараживания затратные, в связи с чем в качестве альтернативы предлагается использовать потоки электромагнитной энергии сверхвысокой частоты (СВЧ). Отмечено, что дезинфицирующий эффект СВЧ-излучения связан с тепловыми [5] и электрическими явлениями [6–9]. Согласно литературным данным, СВЧ-излучения эффективны при инактивации патогенных микроорганизмов в пищевых продуктах [10], медицинских отходах [11–13], отходах животноводства [14], почве [15]. Учёные отмечают зависимость летального воздействия СВЧ-излучения на микроорганизмы от влажности, теплопроводности, диэлектрической

проводимости субстрата, в котором они находятся. Исследование влияния микроволновых полей на семена сорной растительности выявили два механизма воздействия: стимулирующее [3, 16] и подавляющее [3, 17, 18]. Известно, что эффективная критическая температура для жизни патогенных организмов находится в диапазоне 40–120 °С. В зависимости от таксономического положения и физиологического состояния летальными температурами для микроорганизмов являются 100–120 °С [19]. В диапазоне температур 40–70 °С погибают нематоды и яйца гельминтов [14, 20–22], семена сорных растений теряют всхожесть при температурах близких к 100 °С [3].

Приоритетным направлением в изучении действия СВЧ-излучения при обеззараживании корнезакрывающих субстратов является определение оптимальной временной экспозиции, мощности излучения и частоты волны.

Цель работы – определить эффективный режим обеззараживания корнезакрывающего субстрата в электромагнитном поле сверхвысокой частоты.

Задачи:

1) изучить зависимость изменения температуры нагрева торфа и его массы от мощности и временной экспозиции СВЧ-излучения;

2) проанализировать воздействие электромагнитного поля СВЧ на жизнеспособность микроорганизмов и всхожесть семян сорной растительности в изучаемом субстрате;

3) изучить влияние обеззараженного СВЧ-излучением субстрата на рост и развитие тест-объектов.

Материалы и методы исследования

Работа проходила в два этапа. Первый этап проводился в лабораториях Поволжского государственного технологического университета (ПГТУ) «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Центра коллективного пользования («ЭБЭЭ» ЦКП) и «Микробиологии». Второй этап прохо-

дил в малом тепличном комплексе на территории Ботанического сада-института ПГТУ. В работе использовался низинный торф «Альцевского торфопредприятия» с массовой долей воды 18 %, кислотностью ($pH_{КС1}$) 5,3 и общей плотностью 0,324 г/см³.

На лабораторном этапе эксперимента в образцы торфа массой 190 г вносили семена сорной растительности в количестве 100 штук каждого вида. Данная навеска для дальнейшего облучения помещалась в пластиковый контейнер, толщина слоя, обрабатываемого СВЧ-излучением, составляла 3 см. В исследовании использовали семена травянистых и древесных сорных растений:

Echinochloa crus-galli (L.) Beauv. (ежовник обыкновенный) – однолетнее травянистое растение семейства Poaceae, класса Liliopsida;

Chenopodium album L. (марь белая) – однолетнее травянистое растение семейства Chenopodiaceae, класса Magnoliopsida;

Betula pendula Roth (берёза повислая) – древесное растение семейства Betulaceae, класса Magnoliopsida.

В качестве источника электромагнитного поля СВЧ использовался бытовой магнетрон с регулируемым уровнем выходной мощности и частотой излучения 2 450 МГц. В работе было проанализировано воздействие СВЧ-излучения при мощностях 100; 200; 300; 450; 600; 700; 800 Вт. Каждый режим мощности испытывался в следующих временных экспозициях: 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10 мин. Контролем был торф без обработки СВЧ-излучением.

Изучение динамики температуры торфа при облучении проводили с использованием цифрового термометра REXANT RX-512. Для оценки изменения массы торфа производили взвешивание образцов до и после воздействия СВЧ-облучения.

Влияние ЭМП СВЧ на численность микроорганизмов в торфе оценивали методом подсчёта колониеобразующих единиц (КОЕ) [23].

Действие СВЧ-излучения на семена сорной растительности в составе воздушно-сухой навески торфа проводили с помощью учёта всхожести семян согласно ГОСТ 13056.6-97 «Межгосударственный стандарт. Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести» и ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести».

На втором этапе исследований оценивалось влияние торфа, прошедшего обеззараживание СВЧ-излучением, на рост и развитие сеянцев ели европейской (*Picea abies* (L.) H.Karst.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Семена сосны обыкновенной и ели европейской перед экспериментом прошли стратификацию и предпосевную обработку фунгицидами и были посеяны 27.05.2022 года в контейнеры «Plantek 81F» с объёмом ячейки 85 см³. В конце вегетационного периода фиксировали биометрические и весовые показатели сеянцев, а также рассчитывали сохранность сеянцев относительно количества всходов. В условиях закрытого грунта в исследуемом торфе изучался видовой состав сорной растительности и динамика всхожести семян сорных растений. В качестве контроля на втором этапе исследований использовали торф без воздействия СВЧ-излучения и торф после обеззараживания паром под давлением в автоклаве.

Материалы исследования обработаны методами описательной статистики, регрессионного и дисперсионного анализа с использованием прикладной программы Statistika 6 и Microsoft Excel на уровне надёжности 95 %.

Результаты и обсуждение

Для изучения зависимости изменения температуры нагрева торфа от режима СВЧ-излучения был проведён регрессионный анализ. Анализ показал, что интенсивность нагрева торфа зависит от мощности излучения и временной экспозиции. Динамика зависимости описывается функцией $y = a \cdot (1 - \exp(-c \cdot (x)^b)) + m$. Эффектив-

ные температуры разогрева в 100–120 °С отмечались при мощностях 600–800 Вт с длительностью обработки в диапазоне 8–10 минут, а также при 450 Вт с десятиминутным облучением (рис. 1). Температуры, близкие к эффективным (90–100 °С), фиксировались во всех режимах мощности, при этом минимальному

значению мощности соответствовала длительная временная экспозиция. Выявлено, что максимальная скорость разогрева торфа происходит в первые 30 секунд от начала облучения, независимо от режима мощности. Скорость разогрева торфа стабилизируется после 6 минуты нагрева.

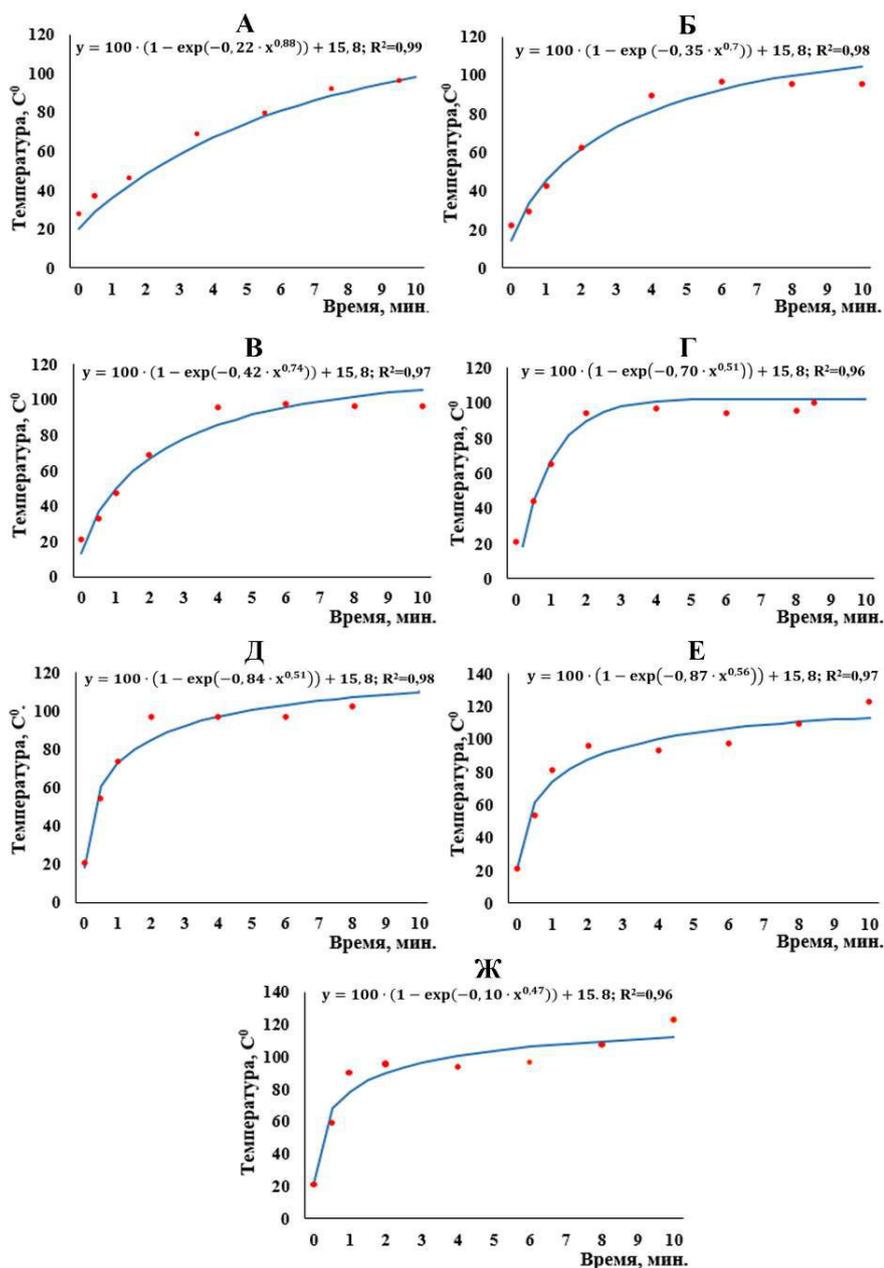


Рис. 1. Зависимость температуры нагрева торфа от мощности СВЧ-излучения и продолжительности облучения (А – мощность 100 Вт, Б – мощность 200 Вт, В – мощность 300 Вт, Г – мощность 450 Вт, Д – мощность 600 Вт, Е – мощность 700 Вт, Ж – мощность 800 Вт)

Fig. 1. Dependence of the peat heating temperature on the power and duration of microwave irradiation (A – power of 100 W, B – power of 200 W, C – power of 300 W, D – power of 450 W, E – power of 600 W, F – power of 700 W, G – power of 800 W)

Разогрев торфа в ЭМП СВЧ связан с присутствием в его составе дипольных молекул воды. Под действием СВЧ-поля происходит переориентация дипольных молекул воды за счёт колебательных и вращательных движений. В переменном электрическом поле молекулы воды находятся в постоянном движении. Эти движения приводят к возникновению между дипольными молекулами силы трения, в результате чего выделяется тепло [5]. Чем больше молекул воды находится в торфе, тем больше выделяется тепловой энергии. В процессе образования тепловой энергии происходит испарение воды. Важным агрофизическим параметром корнезакрывающих субстратов является содержание доступной для растений воды. В связи с чем был проведён регрессионный анализ, который позволил выявить зависимость

изменения массы торфа от мощности СВЧ-излучения и времени его воздействия. Установлено, что интенсивность снижения массы торфа в процессе СВЧ-обеззараживания описывается функцией $y = a \cdot (1 - \exp(-c \cdot x)^b)$, где x – разница между первоначальной массой образца торфа и его массой после обработки СВЧ-излучением. Выявленные закономерности показывают, что минимальные потери массы наблюдаются при режимах мощности от 300–450 Вт при экспозиции 10 минут, при этом соблюдается необходимый для обеззараживания температурный режим (рис. 2). Проведённый анализ потребления электроэнергии в изучаемых режимах СВЧ-обеззараживания показал минимальные затраты энергии при обеззараживании в течение 10 минут при мощности СВЧ-излучения 300 Вт.

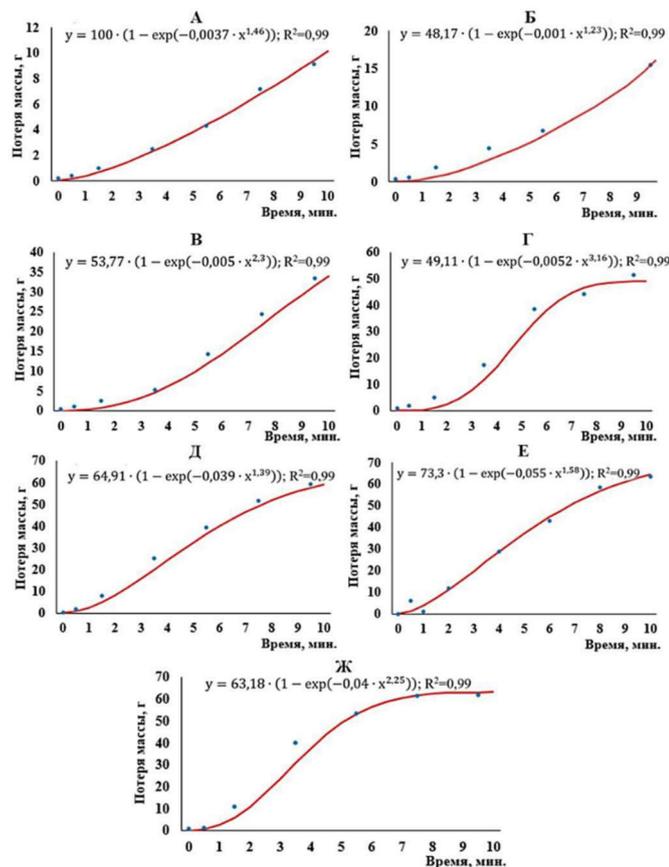


Рис. 2. Зависимость потери массы торфа от мощности излучения и продолжительности обработки (А – мощность 100 Вт, Б – мощность 200 Вт, В – мощность 300 Вт, Г – мощность 450 Вт, Д – мощность 600 Вт, Е – мощность 700 Вт, Ж – мощность 800 Вт)

Fig. 2. Dependence of the peat mass loss on the power and duration of the microwave radiation treatment (A – power of 100 W, B – power of 200 W, C – power of 300 W, D – power of 450 W, E – power of 600 W, F – power of 700 W, G – power of 800 W)

Результаты исследования зависимости температуры разогрева торфа от потери массы при СВЧ-излучении показали, что максимальное количество молекул воды подвергается воздействию СВЧ-энергии в первые минуты. Количество вовлечённых в движение молекул зависит от мощности излучения. Постепенно скорость повышения температуры торфа падает, при этом потери воды повышаются, следовательно, спад скорости нагрева связан со снижением в торфе количества основного поглотителя СВЧ-излучения (воды), в связи с чем целесообразно продолжить эксперименты по СВЧ-обеззараживанию торфа с разными долями воды в его составе.

Изучение воздействия СВЧ-полей на бактерии и микроскопические грибы (рис. 3) выявило подавляющее и стимулирующее действие излучения. Эффективное подавление микроорганизмов отмечалось при мощности излучения в диапазоне 300–450 Вт и временной экспозиции для грибов 6–10 минут, для бактерий – 8–10 минут.

Отсутствие жизнеспособных микроорганизмов в торфе отмечалось при режимах облучения мощностью 600 Вт (8–10 минут) и 700–800 Вт (4–10 минут). Среди эффективных режимов обработки наименьшие затраты электроэнергии отмечались при десятиминутном облучении мощностью 300 Вт. Для этого режима была характерна минимальная потеря воды (18,6 %). Излучение мощностью 300 Вт

стимулировало размножение грибов, при временной экспозиции облучения 2–4 минуты, а бактерий при воздействии СВЧ-поля в течение 2–6 минут. Активация процесса размножения у грибов наблюдалась при одноминутном воздействии СВЧ-излучения мощностью 600 Вт и в течение двух минут при мощности 700 Вт. Увеличение численности КОЕ микроорганизмов в торфе, при воздействии СВЧ-излучений, может быть связано с активацией прорастания спор, находящихся в состоянии покоя.

Оценка взаимосвязи количества колониеобразующих единиц микроорганизмов при различных режимах стерилизации торфа СВЧ-излучением и потери массовой доли воды, связанной с воздействием СВЧ, показала наличие умеренных и сильных корреляционных связей (табл. 1). При повышении мощности СВЧ-излучения увеличивается потеря воды в торфе и снижается число КОЕ микроорганизмов. Наибольшее влияние на снижение численности микроорганизмов оказывали мощности излучения в диапазоне 400...800 Вт (-0,70...-0,82).

Анализ результатов эксперимента по влиянию режимов СВЧ-излучения на всхожесть семян сорных растений в лабораторных условиях показал низкий процент всхожести семян *Betula pendula* Roth (1,4 %) и *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv (8,5 %) (рис. 4).

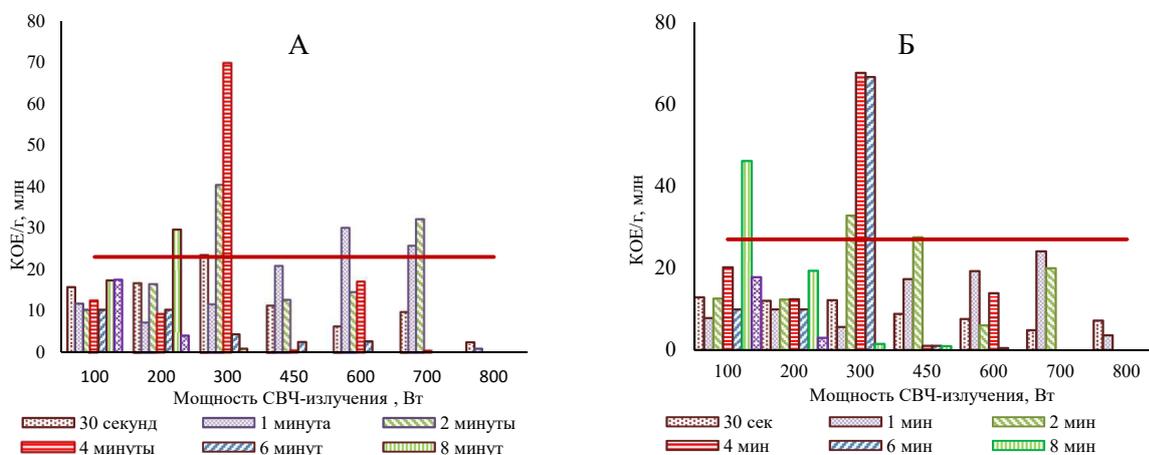


Рис. 3. Количественный анализ микроскопических грибов (А) и бактерий (Б) в торфе после обработки СВЧ-излучением

Fig. 3. Quantitative analysis of microscopic fungi (A) and bacteria (B) in peat after microwave radiation treatment

Таблица 1. Коэффициенты корреляции при оценке взаимосвязи количества КОЕ микроорганизмов и массовой доли потери воды в торфе при СВЧ-облучении

Table 1. Correlation coefficients for estimating the relationship between the number of CFUs of microorganisms and the mass fraction of water loss in peat during microwave irradiation

Микроорганизмы	Мощность СВЧ-излучения						
	100 Вт	200 Вт	300 Вт	450 Вт	600 Вт	700 Вт	800 Вт
Бактерии	0,57	0,07	-0,31	-0,73	-0,73	-0,75	-0,72
Грибы	0,62	0,31	-0,58	-0,82	-0,72	-0,76	-0,70

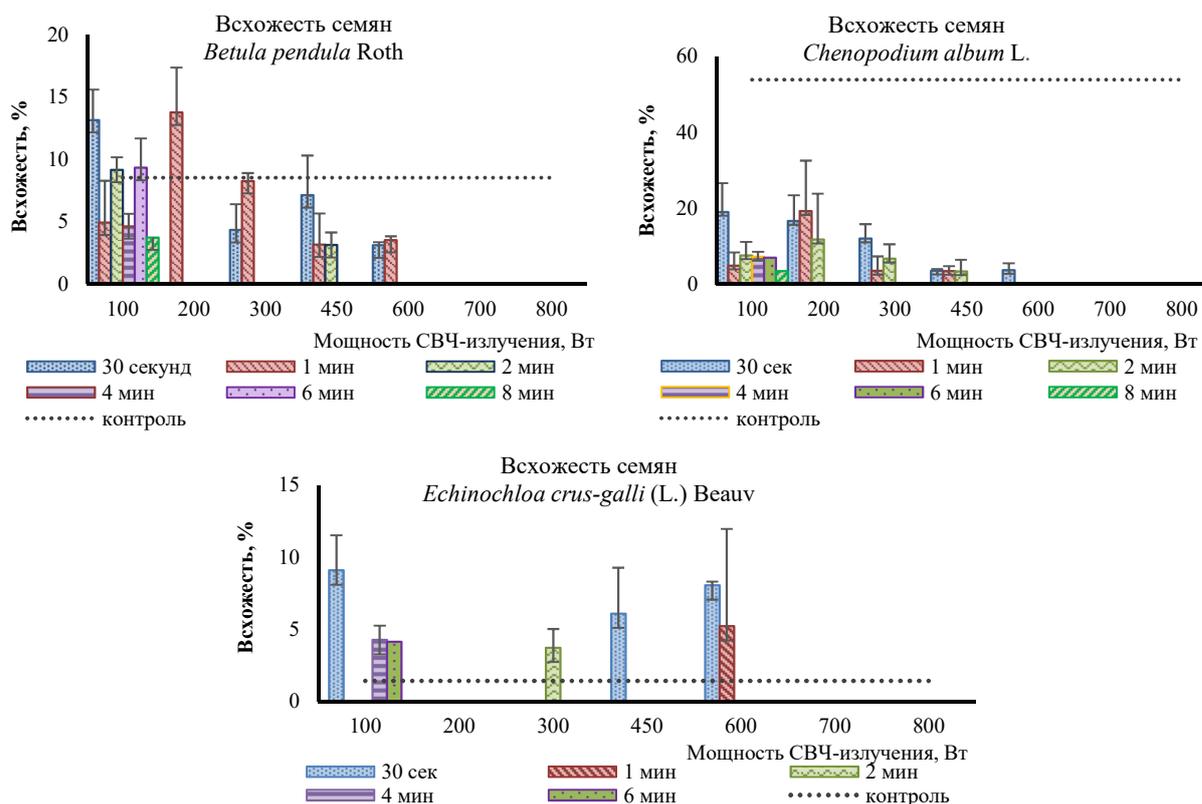


Рис. 4. Всхожесть семян сорных растений в зависимости от режимов облучения
 Fig. 4. Germination capacity of weed seeds depending on irradiation modes

Всхожесть семян *Chenopodium album* L. составила 54 %. Ингибирующее действие исследуемых режимов ЭМИ СВЧ относительно контрольной группы наблюдалось у мари белой. Полное отсутствие всходов отмечалось при мощности излучения в диапазоне 200–450 Вт и продолжительности воздействия СВЧ от 4–8 минут, а также при 600 Вт (1–8 минут), 700 и 800 Вт. Для семян берёзы повислой были отмечены режимы, стимулирующие прорастание семян: при мощности 100 Вт и временной экспозиции 30 сек., 2 мин., 6 мин.; при 200 Вт – 1 мин.; при 700 Вт – 30 сек., 1 мин.; 800 Вт – 30 сек. Потеря всхожести семян берёзы наблюдалась при мощности

СВЧ-излучения 300; 600; 700; 800 Вт, начиная с двух минут воздействия. Режимы обработки мощностью 100 Вт (30 сек., 4–6 мин.), 300 Вт (2 мин.), 450 Вт (30 сек.), 600 Вт (30–60 сек.) повышали естественную всхожесть семян ежовника обыкновенного. В остальных режимах прорастание семян не наблюдалось. Анализ стимулирующих режимов СВЧ-обработки для семян сорных растений выявил эффективные температуры для прорастания семян берёзы и ежовника, они находились в диапазоне 28–80 °С. Таким образом, минимальным эффективным режимом СВЧ-облучения также можно считать 300 Вт при десятиминутной экспозиции.

Второй этап исследований влияния СВЧ-излучения на всхожесть семян сорной растительности проходил в теплице арочного типа с поликарбонатным покрытием и автоматической системой полива. На этом этапе изучалась засорённость исследованного торфа семенами сорной растительности и динамика всхожести сорных семян. В эксперименте использовали торф, обработанный при мощности СВЧ-излучения 800 Вт продолжительностью 6 мин.; торф, обработанный в автоклаве при режиме +120 °С, давление 1,1 атмосфер, длительностью 60 мин., в качестве контроля использовали торф, не подвергшийся обеззараживанию. Видовой состав, количество проросших семян сорных растений и плотность засорённости торфа при разных способах обеззараживания представлен на рис. 5. Анализ видового состава сорных растений выявил пять видов: крестовник обыкновенный (*Senecio vulgaris* L.), берёза повислая (*Betula pendula* Roth), ежовник обыкновенный (*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv), марь белая (*Chenopodium album* L.), горец почечуйный (*Persicaria maculosa* S.F. Gray). Первые всходы сорной растительности в контейнерах с посевами сосны обыкновенной и ели европейской появились на 15 день, наблюдения за всходами сорной растительности продолжались в течение 22 дней.

Плотность засорённости торфа жизнеспособными семенами сорных растений до обеззараживания составляла 0,68 шт/см³,

после воздействия СВЧ-излучения показатели засорённости снизились до 0,46 шт/см³, обработка торфа автоклавом стимулировала прорастание сорных семян, количество жизнеспособных семян со всходами увеличилось до 1,14 шт/см³.

Видовой состав прорастающих семян сорной растительности после обеззараживания СВЧ-излучением сократился до *S. vulgaris* (85 %) и *C. album* (15 %). Автоклавирование стимулировало ростовые процессы семян *B. pendula* (19 %), ранее не прораставших в контрольных образцах. Семена *S. vulgaris* (72 %) и *C. album* (9 %) также давали жизнеспособные всходы. Таким образом, применение СВЧ-излучения эффективно снижает плотность жизнеспособных семян сорной растительности в торфе.

Пик гибели сеянцев сосны и ели от инфекционных болезней приходился на 35 день после посева. Количественная оценка погибших от инфекции сеянцев сосны и ели (рис. 6) показала, что обеззараживание ЭМП СВЧ снижает процент гибели от инфекционных заболеваний сеянцев сосны почти в 4 раза. В торфе, после автоклавирования, сократилось количество инфицированных сеянцев сосны в 9 раз. Существенных различий потери сеянцев ели от инфекционных заболеваний не установлено.

На втором этапе исследований проводилась оценка влияния торфа, обеззараженного СВЧ-излучением, на биометрические параметры сеянцев (табл. 2, 3).

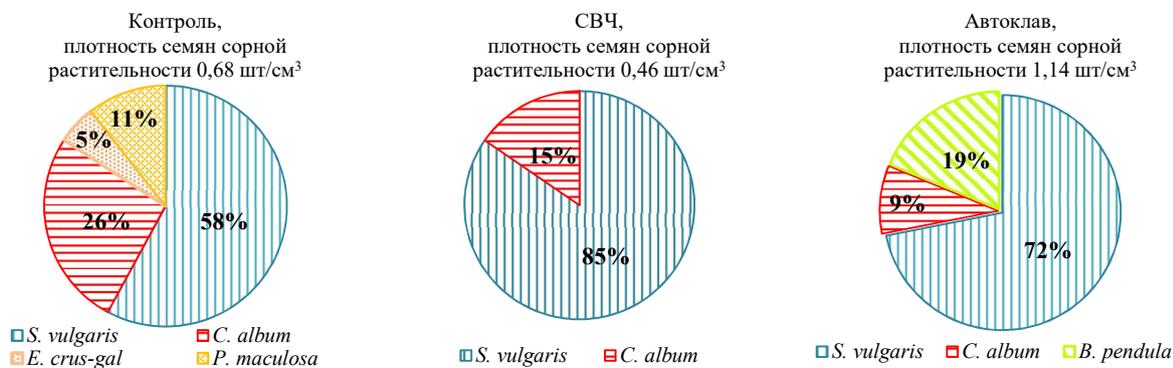


Рис. 5. Видовой состав сорной растительности в торфе
Fig. 5. Species composition of the weed vegetation in peat

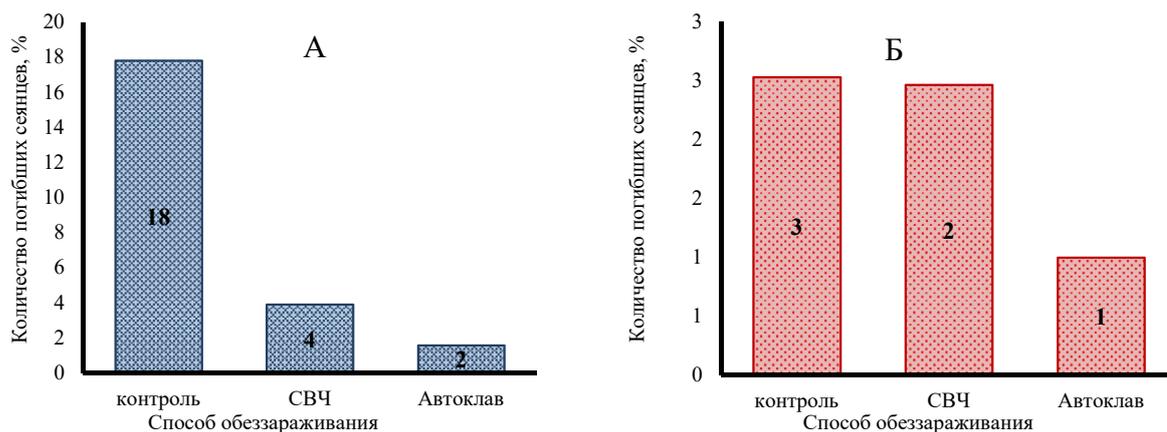


Рис. 6. Количество сеянцев, погибших от инфекционных заболеваний: А – *P. sylvestri*, Б – *P. abies*
 Fig. 6. Number of seedlings that died from infectious diseases: А – *P. sylvestris*, Б – *P. abies*

Таблица 2. Посевные качества семян, биометрические и весовые показатели сеянцев сосны обыкновенной, выращенной на торфе с разными вариантами обеззараживания

Table 2. The sowing qualities of seeds and the biometric and weight indicators of seedlings of Scots pine trees that were grown on peat subjected to different disinfection options

Вариант обеззараживания	Высота стволика, см	Длина корня, см	Диаметр корневой шейки, мм	Всхожесть, %	Энергия прорастания, %	Сохранность, %	Масса 100 растений, г	
							надземной части	корней
Контроль	5,1±0,11	10,6±0,39	1,0±0,02	51,0	28,8	78,3	13,2±1,08	6,3±0,23
СВЧ	6,1±0,17	10,5±0,34	1,1±0,03	72,4	34,6	92,6	19,9±1,68	8,9±0,67
Автоклав	6,0±0,15	9,3±0,34	1,0±0,03	57,6	58,0	94,5	16,2±0,59	7,4±0,53
НСР ₀₅	*	*	*	*	*	*	3,1	1,8
F _{расч.}	3,3	0,6	0,2	2,2	4,9	1,1	8,8	6,2
F _{табл.}	5,1							
Доля влияния фактора, %	52,3	16,8	5,2	41,8	62,2	26,1	75,0	67,3

Примечание: * – различие на 5 % уровне значимости не существенно ($F_{расч.} < F_{табл.}$).

Таблица 3. Биометрические показатели и посевные качества семян ели европейской, выращенной на торфе с разными вариантами обеззараживания

Table 3. The biometric indicators and the sowing qualities of seeds of Norway spruce trees grown on peat subjected to different disinfection options

Вариант обеззараживания	Высота стволика, см	Диаметр стволика у корневой шейки, мм	Кол-во боковых побегов, шт.	Всхожесть, %	Энергия прорастания, %	Сохранность, %
Контроль	2,1±0,09	0,7±0,03	1,2±0,03	42,8	18,1	87,7
СВЧ	3,2±0,87	1,1±0,02	1,2±0,09	31,3	5,3	88,2
Автоклав	3,8±0,10	0,9±0,09	1,2±0,02	60,9	30,9	92,6
НСР ₀₅	*	0,26	*	*	16,61	21,7
F _{расч.}	1,54	5,99	0,51	2,26	7,08	0,19
F _{табл.}	5,14					
Доля влияния фактора, %	33,9	66,6	16,9	42,9	70,3	58,9

Примечание: * – различие на 5% уровне значимости не существенно ($F_{расч.} < F_{табл.}$).

Дисперсионный анализ не показал достоверных различий между линейными показателями семян и посевными качествами семян, выращенных на субстратах с разными способами обеззараживания. Зато средние показатели массы надземной части и массы корневой системы семян сосны, выращенных на торфе, обработанном ЭМП СВЧ, достоверно были выше, чем в контрольном варианте и при обеззараживании паром в автоклаве.

Дисперсионный анализ биометрических показателей семян ели европейской (табл. 3), выращенных на торфе с разными вариантами обеззараживания, выявил достоверно высокие показатели диаметра стволиков у корневой шейки в варианте обеззараживания СВЧ-излучением ($F_{\text{расч.}}=5,99 > F_{\text{табл.}}=5,14$). Энергия прорастания семян в варианте с СВЧ-обработкой торфа была достоверно ниже по сравнению с контролем и обработкой в автоклаве.

Выводы

1. Эффективные режимы обеззараживания торфа в электромагнитном поле сверхвысокой частоты, при которых температура разогрева торфа приближалась к 100 °С, достигались при мощности излучения 700–800 Вт и продолжительности облучения 10 мин.

2. Оптимальным режимом стерилизации торфа СВЧ-излучением являлась мощность 300 Вт и временная экспозиция облучения 10 мин.

3. Определены режимы СВЧ-излучения, ингибирующие и стимулирующие прорастание часто встречаемых в торфе семян сорных растений. Полученные данные могут быть использованы при подборе стратегии борьбы с сорной растительностью.

4. Обеззараживание торфа СВЧ-излучением не влияло на линейные параметры семян сосны обыкновенной и ели европейской. Положительное влияние обеззараживания торфа СВЧ-излучением отмечалось на биомассу семян *P. sylvestris* и диаметр стволиков у корневой шейки семян *P. abies*.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бобушкина С. В., Сеньков А. О., Файзулин Д. Х. Практика выращивания лесного посадочного материала с закрытой корневой системой применительно к тепличным комплексам Архангельской области // Вопросы лесной науки. 2020. Т. 3, № 4. С. 1–16. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-16; EDN: DRMUYP

2. Чернаков В. В. Распространение и вредность бактериальных болезней лесных пород в России // Защита и карантин растений. 2015. № 11. С. 19–21. EDN: UMSPNL

3. Толчин А. Э., Мухортов Д. И., Дрошнев О. Н. Закономерности снижения всхожести семян сорных растений в корнезакрывающих субстратах при СВЧ-облучении // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. 2015. № 3. С. 54–59. EDN: UIZIYJ

4. Баранов Л. А., Бурнаев М. Г. Устройство для электротермической обработки почвы защищенного грунта // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2007. № 20 (92). С. 46–49. EDN: KWUPRZ

5. Королев А. А., Тюрина С. Б., Тришканева М. В. Анализ применения микроволнового излучения в технологиях стерилизации растительного сырья // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2019. № 3. С. 81–91. DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-3-81-91; EDN: CMIWZY

6. Decareau R. V. Microwaves in the food processing industry. Orlando etc.: Acad. Press; 1985. 234 p.

7. Khalil H. M., Villota R. Comparative Study on Injury and Recovery of *Staphylococcus aureus* using Microwave and Conventional Heating // Journal of Food Protection. 1988. Vol. 51, iss. 3. Pp. 181–186. DOI: 10.4315/0362-028X-51.3.181

8. Tajchakavit S., Ramaswamy H. S., Fustier P. Enhanced destruction of spoilage microorganisms in apple juice during continuous flow microwave heating // Food Research International. 1998. Vol. 31, iss. 10. Pp. 713–722. DOI: 10.1016/S0963-9969(99)00050-2

9. Exposure to high-frequency electromagnetic field triggers rapid uptake of large nanosphere clusters by pheochromocytoma cells / P. G. T. Perera, T. H. P. Nguyen, C. Dekiwadia et al. // International Journal of Nanomedicine. 2018. Vol. 13. Pp. 8429–8442. DOI: 10.2147/IJN.S183767

10. Мельниченко А. В., Ихлов Б. Л., Оценков А. Ю. Способ быстрой одновременной стерилизации, дезинфекции и дезинсекции пищевых продуктов: пат. 2677783 С2 Российская Федерация, МПК А23L 3/01. № 2016150232; заявл. 20.12.2016; опубл. 21.01.2019. EDN: PMLQGE

11. Ихлов Б. Л., Шурыгин А. А., Дробкова В. А. Возможность бактерицидного действия СВЧ на штаммы *Mycobacterium avium* и *Mycobacterium*

tuberculosis // Туберкулез и болезни легких. 2019. Т. 97, № 1. С. 25–27. DOI: 10.21292/2075-1230-2019-97-1-25-27; EDN: YXGJQD

12. Старкова Д. А. *Mycobacterium avium* – актуальный возбудитель микобактериоза человека // Инфекция и иммунитет. 2013. Т. 3, № 1. С. 7–14. DOI: 10.15789/2220-7619-2013-1-7-14; EDN: QCUBVJ

13. Measuring the elasticity of poly-l-proline helices with terahertz spectroscopy / M. T. Ruggiero, J. Sibik, R. Orlando et al. // *Angewandte Chemie International Edition*. 2016. Vol. 55, iss. 24. Pp. 6877–6881. DOI: 10.1002/ange.201603825

14. Петрова Г. В., Буракаева А. Д., Сорокун С. В. Применение СВЧ-излучений для обеззараживания птичьего помёта // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020. № 5 (85). С. 145–148. EDN: YNEOWI

15. Денисова Т. В., Колесников С. И. Влияние СВЧ-излучения на ферментативную активность и численность микроорганизмов почв Юга России // Почвоведение. 2009. № 4. С. 479–483. EDN: JXOUPD

16. Шамгунов И. И., Стенура А. В. Исследование влияния предпосевного СВЧ-воздействия на морфологические показатели прорастающих семян яровой пшеницы // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). Ст. 85. EDN: ZEONNP

17. Повышение эффективности предпосевной СВЧ-обработки семян / Н. Д. Полевик, В. М. Попов, В. А. Бидянов и др. // Механизация и электрифика-

ция сельского хозяйства. 2012. № 5. С. 23–24. EDN: WWHYJZ

18. Старунов А. В., Нурписов Ж. А., Жикеев А. А. Влияние электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на всхожесть семян сорных растений // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2014. № 2 (46). С. 63–66. EDN: SFSCIX

19. Орлов В. В., Алферев С. А. Методы предотвращения порчи сухих сельскохозяйственных продуктов при хранении // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2011. № 1. С. 229–231. EDN: NDKBYX

20. Действие СВЧ-излучения на метацеркарий описторхисов и личинок трихинелл / А. Н. Пельгунов, И. М. Одоевская, А. В. Хрусталева и др. // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2019. № 3. С. 265–272. DOI: 10.1134/S0002332919030081; EDN: EHOVVS

21. Вредители тепличных и оранжерейных растений (морфология, образ жизни, вредность, борьба) / А. К. Ахатов, С. С. Ижевский, Ю. И. Мешков и др. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2004. 307 с. EDN: QKWDBR

22. Яркулов Ф. Я. Борьба с галловыми нематодами в закрытом грунте // Защита и карантин растений. 2006. № 8. С. 25–26. EDN: HTVRMD

23. Практикум по микробиологии / А. И. Нетрусов, М. А. Егорова, Л. М. Захарчук и др.; под ред. А. И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 608 с.

Статья поступила в редакцию 22.02.2024; одобрена после рецензирования 06.05.2024; принята к публикации 10.06.2024

Информация об авторах

МУХОРТОВ Дмитрий Иванович – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – использование нетрадиционных органических удобрений при искусственном лесовосстановлении. Автор 180 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0859-4224>; SPIN-код: 7646-2846

ОКАЧ Мария Александровна – аспирант кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – модификация корнезакрывающих субстратов. Автор 44 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7147-1676>; SPIN-код: 2097-0501

МАЙОРОВ Никита Дмитриевич – аспирант кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Автор пяти научных публикаций. SPIN-код: 6668-0698

Вклад авторов:

Мухортов Д. И. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; проведение статистического анализа; доработка текста и итоговых выводов; утверждение окончательного варианта статьи.

Окач М. А. – проведение исследований; проведение статистического анализа; интерпретация полученных данных; редактирование текста; разработка итоговых выводов.

Майоров Н. Д. – проведение исследований.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article
UDC 630*232.422
<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.6>
EDN: QBEZNM

Disinfection of Substrates for Growing Containerized Tree Seedlings

D. I. Mukhortov[✉], M. A. Okach, N. D. Mayorov

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

Abstract. *Introduction.* Production of ball-rooted planting stock compliant with relevant standards suggests the use of a quality root covering substrate during growing. The substrate must be characterized by the optimal physicochemical properties, absence of weed seeds and pathogenic microflora. Electromagnetic fields of ultrahigh frequencies are proposed to be used as an alternative method of disinfection. *The purpose* of the work is to determine an effective mode of disinfection of root covering substrates in an ultrahigh frequency electromagnetic field (microwave EMF). *The object* of the study was lowland peat modified with weed seeds. The experiment involved a quantitative analysis of the colony-forming units (CFUs) of microorganisms in the peat, as well as studying the germination capacity of weed seeds and the biometric parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Norway spruce (*Picea abies*) seedlings. The effects of microwave radiation on the changes in the peat temperature and mass were investigated. *Results.* The analysis of the peat heating temperature variations depending on the microwave radiation mode showed that the intensity of peat heating depends on the power and exposure time of irradiation. The effective heating temperatures of 100-120° C were recorded at power levels of 600-800 W, with an exposure duration of 8-10 minutes, as well as at 450 W, with a 10-minute exposure. The minimum loss of the peat mass due to microwave irradiation was observed at power levels of 300-450 W, with an exposure time of 10 minutes. The study of the impact of microwave fields on microorganisms revealed both suppressive and stimulating effects of irradiation applied under different modes. The analysis of the results of the experiment on the effects of microwave radiation modes on the germination capacity of weed seeds found a total absence of weed seedlings when applying irradiation at a power of 200–450 W for 4–8 minutes. Scots pine seedlings grown on peat pre-treated with microwave irradiation exhibited an increase in the weight of seedlings as compared to the control. In Norway spruce seedlings, the germination energy of seeds decreased, while the root collar diameter significantly increased. *Conclusion.* The optimal mode of peat sterilization via microwave irradiation was found to be at a power of 300 W, with the exposure time of 10 minutes. The microwave radiation modes that inhibit seed germination were determined. Peat disinfection by microwave irradiation has a positive effect on the weight of Scots pine seedlings and reduces the germination energy of Norway spruce seeds.

Keywords: forest planting material; root-covering substrate; ultrahigh frequency electromagnetic field; effective heating temperature; microorganisms; weed seeds

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Mukhortov D. I., Okach M. A., Mayorov N. D. Disinfection of Substrates for Growing Containerized Tree Seedlings. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(2):6–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.6>; EDN: QBEZNM

REFERENCES

1. Bobushkina S. V., Senkov A. O., Fayzulin D. H. Practice on growing of forest containerized seedlings applicable to the greenhouse complexes of the Arkhangelsk region. *Forest Science Issues.* 2020;3(4):1-16. DOI: 10.31509/2658-607x-2020-3-4-1-16; EDN: DRMUYF (In Russ.).
2. Cherpakov V. V. Distribution and harmfulness of bacterial diseases of forest species in Russia. *Plant Protection and Quarantine.* 2015;(11):19–21. EDN: UMSPNL (In Russ.).
3. Tolchin A. E., Muhortov D. I., Droshneva O. N. Natural decrease germination of weed seeds in root closing substrate at microwave irradiation root closing. *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: Tehnologicheskaja.* 2015;(3):54–59. EDN: UIZIYJ (In Russ.).

4. Baranov L. A., Burnaev M. G. Device for electrothermal treatment of protected soil. *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"*. 2007;(20(92)):46–49. EDN: KWUPRZ (In Russ.).
5. Korolev A. A., Tyurina S. B., Trishkaneva M. V. The application of microwave radiation for sterilization of plant raw materials. *Scientific journal NRU ITMO. Series "Processes and Food Production Equipment"*. 2019;(3):81–91. DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-3-81-91; EDN: CMIWZY (In Russ.).
6. Decareau R. V. *Microwaves in the food processing industry*. Orlando etc.: Acad. Press; 1985. 234 p.
7. Khalil H. M., Villota R. Comparative study on injury and recovery of *Staphylococcus aureus* using microwave and conventional heating. *Journal of Food Protection*. 1988;51(3):181–186. DOI: 10.4315/0362-028X-51.3.181
8. Tajchakavit S., Ramaswamy H. S., Fustier P. Enhanced destruction of spoilage microorganisms in apple juice during continuous flow microwave heating. *Food Research International*. 1998;31(10):713–722. DOI: 10.1016/S0963-9969(99)00050-2
9. Perera P. G. T., Nguyen T. H. P., Dekiwadia C. et al. Exposure to high-frequency electromagnetic field triggers rapid uptake of large nanosphere clusters by pheochromocytoma cells. *International Journal of Nanomedicine*. 2018;13:8429-8442. DOI: 10.2147/IJN.S183767
10. Melnichenko A. V., Ikhlov B. L., Oshchepkov A. Yu. Method of quick simultaneous sterilization, disinfection and disinsection of food products. Patent RF 2677783, 21 January 2019. (In Russ.).
11. Ikhlov B. L., Shurygin A. A., Drobkova V. A. Potential bactericidal action of UHF on the strains of *Mycobacterium avium* and *Mycobacterium tuberculosis*. *Tuberculosis and Lung Diseases*. 2019;97(1):25–27. DOI: 10.21292/2075-1230-2019-97-1-25-27; EDN: YXGJQD (In Russ.).
12. Starkova D. A. *Mycobacterium avium* as an actual pathogen of human mycobacteriosis. *Russian Journal of Infection and Immunity*. 2013;3(1):7–14. DOI: 10.15789/2220-7619-2013-1-7-14; EDN: QCUBVJ (In Russ.).
13. Ruggiero M. T., Sibik J., Orlando R. et al. Measuring the elasticity of poly-l-proline helices with terahertz spectroscopy. *Angewandte Chemie International Edition*. 2016;55(24):6877–6881. DOI: 10.1002/ange.201603825
14. Petrova G. V., Burakaeva A. D., Sorokun S. V. Application of microwave radiation for poultry dung disinfection. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020;(5(85)):145–148. EDN: YNEOWI (In Russ.).
15. Denisova T. V., Kolesnikov S. I. The influence of super-high-frequency radiation on the enzyme activity and number of microorganisms in soils of Southern Russia. *Eurasian Soil Science*. 2009;(4):479–483. EDN: JXOUPD (In Russ.).
16. Shamgunov I. I., Stepura A. V. Investigation of the influence of presowing microwave effect on the morphological parameters of germinating seeds of spring wheat. *Engineering Journal of Don*. 2017;(2(45)). Art. 85. EDN: ZEONNP (In Russ.).
17. Polevik N. D., Popov V. M., Bidjanov V. A. et al. Increasing the efficiency of pre-sowing microwave seed treatment. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2012;(5):23–24. EDN: WWHYJZ (In Russ.).
18. Starunov A. V., Nurpisov Zh. A., Zhikeev A. A. Impact of electromagnetic radiation of microwaves on weed plants germinating power. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2014;(2(46)):63–66. EDN: SFSCIX (In Russ.).
19. Orlov V. V., Alferev S. A. Methods to prevent spoilage of dry agricultural products in storage. *Scientific journal NRU ITMO. Series "Processes and Food Production Equipment"*. 2011;(1):229–231. EDN: NDKBYX (In Russ.).
20. Pelgunov A. N., Odoevskaya I. M., Khrustalev A. V. et al. The effect of microwave radiation on metacercaries of opistorchiss and larvae of trichinella. *News of the Russian Academy of Sciences. Biological Series*. 2019;(3):265–272. DOI: 10.1134/S0002332919030081; EDN: EHOVVS (In Russ.).
21. Ahatov A. K., Izhevskij S. S., Meshkov Ju. I. Pests of greenhouse and warmhouse plants (morphology, lifestyle, harmfulness, control). Moscow: Tovarishhestvo nauchnyh izdanij KMK; 2004. 307 p. EDN: QKWDBR (In Russ.).
22. Yarkulov F. Ya. Control of root-knot nematodes in protected ground. *Plant Protection and Quarantine*. 2006;(8):25–26. EDN: HTVRMD (In Russ.).
23. Netrusov A. I., Egorova M. A., Zakharchuk L. M. et al. Practical training in microbiology. Netrusov A. I. (ed.). Moscow: Akademiya; 2005. 608 p. (In Russ.).

The article was submitted 22.02.2024; approved after reviewing 06.05.2024; accepted for publication 10.06.2024

Information about the authors

Dmitry I. Mukhortov – Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor and Head of the Chair of Forest Plantations, Selection, and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – usage of non-conventional inorganic fertilizers for artificial reforestation. Author of 180 publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0859-4224>; SPIN: 7646-2846

Maria A. Okach – Postgraduate student at the Chair of Forest Plantations, Selection, and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – modification of root-covering substrates. Author of 44 publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7147-1676>; SPIN: 2097-0501

Nikita D. Majorov – Postgraduate student at the Chair of Forest Plantations, Selection, and Biotechnology, Volga State University of Technology. Author of five publications. SPIN: 6668-0698

Contribution of the authors:

Mukhortov D. I. – academic advising; conceptualization; methodology development; statistical analysis; refining the text and final conclusions; approval of the final version of the article.

Okach M. A. – conducting research; statistical analysis; interpretation of findings; text review and editing; drafting the final conclusions.

Majorov N. D. – conducting research.

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

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 58.085; 634.739.2; 634.738; 634.737

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.20>

EDN: WPJKIX

Влияние макроэлементного состава среды WPM и регуляторов роста на морфогенез вегетативных и генеративных тканей сортовых форм голубики

Д. Н. Зонтиков[✉], К. В. Малахова, О. О. Березина

Костромской государственной университет,
Российская Федерация, 156005, Кострома, ул. Дзержинского, 17/11
zontikovdn@mail.ru[✉]

Аннотация. *Введение.* Высокая востребованность в пищевом производстве сортовых форм голубики обуславливает необходимость исследований, посвящённых особенностям культуры ткани сортов, способных как послужить основой получения новых сортов при селекции, так и оптимизировать технологию клонального микроразмножения ценных сортовых форм голубики. Фундаментальное значение имеет вопрос переключения генеративных тканей микроспор на спорофитный путь развития. Ключевым фактором, определяющим активность морфогенеза растительных тканей в культуре *in vitro*, является содержание макроэлементов и регуляторов роста в составе питательной среды. *Цель* исследования – определить влияние некоторых макроэлементов и регуляторов роста на активность морфогенеза вегетативных и генеративных тканей сортов голубики узколистной в культуре *in vitro*. *Материал и методы исследования.* Статья посвящена рассмотрению вопросов культуры ткани вегетативных и генеративных структур сортов голубики узколистной (сорта “North Country”, “North Land” и “North Blue”), влиянию качественного и количественного содержания макроэлементов и регуляторов роста растений в питательной среде на активность морфогенеза вегетативных и генеративных тканей эксплантов. При этом были испытаны питательные среды с содержанием макроэлементов в концентрациях от 50 до 150 % от прописи состава среды McCown Woody Plant (WPM). В качестве контрольной среды применялась концентрация 100 % прописи среды WPM. Испытаны регуляторы роста 2-изопентиладенин (2-ip) и зеатина (Zea) 1–4 мг/л с добавлением индолилуксусной кислоты (IAA) при работе с вегетативными тканями и 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота (2,4-D) 0,5–2,5 мг/л при работе с тканями генеративных структур. *Результаты.* Выявлена специфичность морфогенеза вегетативных и генеративных тканей рассматриваемых сортов на испытываемых средах. Активность морфогенеза вегетативных тканей сортов “North Land” и “North Blue” была оптимальна на контрольной среде с добавлением 3 мг/л Zea и 3 мг/л 2-ip соответственно. Побегообразование сорта “North Country” было наиболее активным на 75 % WPM и 2 мг/л Zea. Продолжительность жизнеспособности генеративных тканей пыльника была максимальной при концентрации 125 % прописи WPM для всех трёх сортов. Число образовавшихся эмбриоидов было наибольшим при добавлении 1,0 мг/л 2,4-D для “North Land” и “North Country” и 1,5 мг/л 2,4-D для “North Blue”. *Вывод.* Данное исследование выявило зависимые от концентрации макроэлементного состава и контролируемые регуляторами роста особенности активации переключения развития микроспор с гаметофитной на спорофитную программу у сортовых форм голубики узколистной.

Ключевые слова: *Vaccinium angustifolium* Aiton.; “North Country”; “North Land”; “North Blue”; морфогенез; геммогенез; эмбриоидогенез; макроэлементы; регуляторы роста

Финансирование: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-26-20086, <https://rscf.ru/project/22-26-20086/>

Для цитирования: Зонтиков Д. Н., Малахова К. В., Березина О. О. Влияние макроэлементного состава среды WPM и регуляторов роста на морфогенез вегетативных и генеративных тканей сортовых форм голубики // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 20–30. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.20>; EDN: WPJKIX

© Зонтиков Д. Н., Малахова К. В., Березина О. О., 2024

Введение

В настоящее время в нашей стране, как и за рубежом, наблюдается значительный интерес к сортам и видам рода *Vaccinium* L. В мире больших успехов достигли в плантационном выращивании клюквы, прежде всего клюквы крупноплодной (*Vaccinium macrocarpos* (Aiton) Pursh.), в результате селекционной работы получены высокопродуктивные сорта брусники *Vaccinium vitis-idaea* L., однако главной культурой, которая на порядок превосходит по объёмам производства все остальные в совокупности, является голубика [1]. Причин для этого несколько, но в основном – органолептические характеристики. Преимущественно при селекции новых сортов используют вид голубика высокорослая (*Vaccinium corymbosum* L.). Сорта, получаемые на основе голубики высокорослой, имеют высокую урожайность и отличные вкусовые качества, но теплолюбивость данных сортов является серьёзным недостатком для регионов с умеренным климатом [2]. В связи с этим канадскими селекционерами на основе голубики узколистной (*Vaccinium angustifolium* Aiton.) были получены сорта для регионов с холодным климатом [3].

В настоящее время метод культуры ткани широко применяется как для селекции [4, 5], так и для клонального микро-размножения для получения посадочного материала сортов голубики [6]. Нужно отметить, что работ по культуре вегетативной и генеративной ткани голубики узколистной очень немного, в основном проводят исследования в отношении имеющей большее экономическое значение голубики высокорослой [7]. Вместе с тем эта работа очень актуальна, поскольку для получения посадочного материала применяют только метод вегетативного размножения, а использование удвоенных гаплоидов в селекции даёт возможность быстрого получения гомозиготных линий, что облегчает селекцию фенотипов по количественным и качественным признакам, одновременной генетической фиксации в каждом локусе в пределах одного поколения [8]. Это позволяет избежать занима-

ющих много времени работ по самоопылению, обратному скрещиванию, прежде чем можно будет получить инбредные линии [9].

При культивировании клеток и тканей голубики *in vitro* чаще всего используют питательную среду McCown Woody Plant (WPM) [10]. Вместе с тем для каждого сорта необходимо подбирать свой состав питательной среды, прежде всего, по макроэлементам и регуляторам роста [11]. Исходя из этого, **цель** нашей работы – определить влияние некоторых макроэлементов и регуляторов роста на активность морфогенеза вегетативных и генеративных тканей сортов голубики узколистной в культуре *in vitro*.

Материалы и методы

В качестве модельных объектов нами было взято три сорта: “North Country”, “North Land” и “North Blue”. Эти сорта по основным хозяйственно ценным признакам схожи, получены селекционерами в США, специально для культивирования в условиях сурового климата. Они неприхотливы (по сравнению с сортами, полученными от голубики высокорослой), отличаются неплохой урожайностью, коротким вегетативным периодом. Устойчивость к холоду в первую очередь определяется небольшой (до 1 м) высотой растений.

Для лабораторных исследований и получения донорных эксплантов вегетативных и генеративных побегов использовали метод выгонки побегов [12].

В работе по изучению влияния макроэлементного состава и регуляторов роста на вегетативные ткани использовали вегетативные побеги возрастом 21–26 суток; на генеративные ткани – генеративные побеги 14–20 суток. Стерилизацию вегетативных и генеративных побегов проводили по схеме: 1,5 минуты в 70 % водном растворе этанола, после 12 минут стерилизовали в 4 % водном растворе гипохлорита натрия и промывали в трёх сосудах со стерильной водой, объёмами 100 мл каждый.

На питательные среды для оценки влияния различных концентраций макроэлементов и регуляторов роста помещали:

части вегетативных побегов, которые представляли собой метамеры вегетативного побега длиной 0,5–1,0 см (рис. 1, а), и генеративные органы цветка – пыльники (рис. 1, б). Пыльники выделяли из бутонов длиной 4 мм до момента их раскрытия, после стерилизации помещали их на питательную среду.

Для оценки влияния макроэлементов питательной среды на рост и развитие побегов и эмбриоидов из пыльников использовали следующие пропорционально уменьшенные и увеличенные по составу макроэлементов составы питательной среды WPM. Были изучены уменьшенные концентрации: 50, 75 %, а также увеличенные: 125 и 150 %, в качестве контроля использовали концентрацию в соответствии с протоколом [13]. Состав и концентрация микроэлементов и витаминов в соответствии с протоколом [13], сахарозы (20 г/л), агара (5,5 г/л), pH от 4,0 до 4,5.

В качестве регуляторов роста нами оценивались различные концентрации 2-изопентиладенина (2-*ip*) и зеатина (*Zea*) от 1 до 4 мг/л для выявления влияния на активность морфогенеза вегетативных тканей с добавлением индолилуксусной кислоты (IAA) в пропорции 1 к 10. Эффективность данных регуляторов роста была ранее обозначена в отношении ростовых

процессов ряда других представителей рода *Vaccinium* [6, 7]. В разделе работы, посвящённом генеративным тканям, использовали 2,4-дихлорфеноксиуксусную кислоту (2,4-D) в концентрации от 0,5 до 2,5 мг/л для выявления влияния на морфогенез пыльников.

Эффективность состава питательной среды на морфогенез и ростовые процессы побегов и эмбриоидов оценивали по следующим параметрам: начало роста побегов (сутки) и количество инициированных к росту почек на эксплант (шт.), количество образовавшихся метамеров на эксплант (шт.) для побегов и сохранение жизнеспособности пыльников (сутки), начало появления эмбриоидов (сутки), количество образовавшихся эмбриоидов на эксплант (шт.) для генеративных тканей. Описываемые опыты были проведены в трёхкратной повторности в количестве 20 эксплантов на каждую вариацию опыта.

Экспериментальные данные представлены в виде средних арифметических значений (M) с указанием ошибки среднего ($\pm SEM$) и коэффициента вариации (Cv). Расчёт доверительного интервала на основании t -распределения Стьюдента при уровне значимости 0,05 проводили с использованием статистического пакета программы Microsoft Excel 2010.

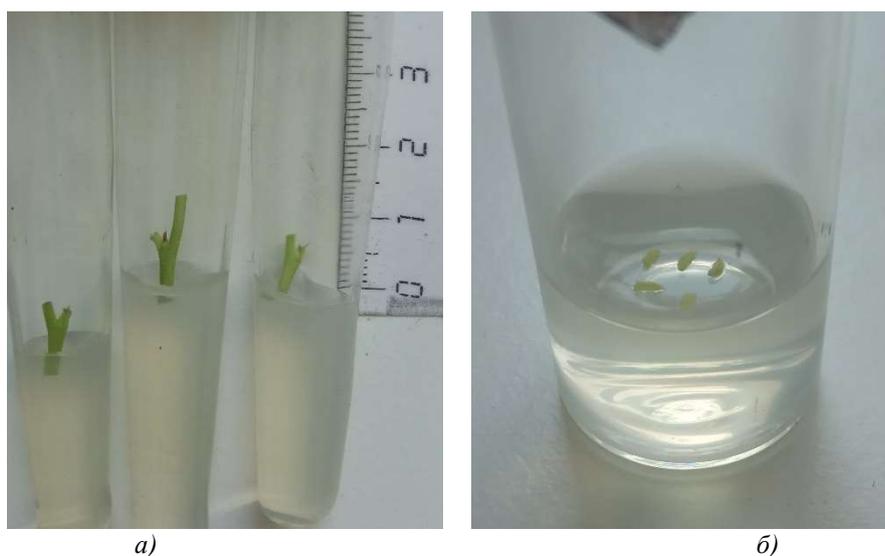


Рис. 1. Донорные экспланты на питательных средах *in vitro*:
а) метамеры вегетативного побега; б) пыльники

Fig. 1. Donor explants on nutrient media *in vitro*: a) metamers of vegetative shoots; b) anthers

Результаты и их обсуждение

В опыте по изучению влияния элементного состава питательной среды на активность морфогенеза голубики узколистной было установлено, что для сортов “North Land” и “North Blue” оптимальной является питательная среда с полным составом макроэлементов (контроль). Сорт “North Land” начинал образовывать вегетативные почки на 32 ± 1 сутки, сорт “North Blue” на 36 ± 1 сутки, при этом количество образовавшихся почек составило

$2,9 \pm 0,1$ и $2,5 \pm 0,1$ на эксплант соответственно. Для сорта “North Country” лучший вариант среды был с уменьшенным составом макроэлементов до 75 %. При этом побеги были хорошо развиты (рис. 2). В этом варианте рост почек наблюдали уже в среднем на 20 ± 3 сутки с образованием $3,1 \pm 0,2$ почки на эксплант. Для всех сортов отмечено, что при повышении содержания макроэлементов до 150 % морфогенез полностью отсутствовал (табл. 1).



Рис. 2. Побегообразование у голубики узколистной: сорт “North Country” на питательной среде WPM, содержащей 75 % макроэлементов

Fig. 2. Shoot formation in *Vaccinium angustifolium* Ait.: the ‘North Country’ variety on WPM nutrient medium containing 75 % of macroelements

Таблица 1. Влияние концентрации макроэлементов на морфогенез голубики узколистной сортов “North Land”, “North Blue”, “North Country” на этапе введения в культуру *in vitro* (питательная среда WPM, сахара 20 г/л; pH 4,0-4,5)

Table 1. The influence of the concentration of macroelements on the morphogenesis in the ‘North Land’, ‘North Blue’, ‘North Country’ varieties of *Vaccinium angustifolium* Aiton at the stage of introduction into the culture *in vitro* (WPM nutrient medium, sucrose 20 g/l; pH 4.0-4.5)

Концентрация макроэлементов в питательной среде WPM, %	Сорт	Начало роста побегов, сутки, M±SEM	Количество инициированных к росту почек на эксплант, шт., M±SEM	Количество неморфогенных эксплантов, %
50	“North Land”	45±2	0,6±0,2	32
75		37±1	1,1±0,3	21
100		32±1	2,9±0,1	10
125		40±3	2,0±0,2	30
150		0	0	100
50	“North Blue”	43±2	1,0±0,2	30
75		29±2	1,5±0,2	25
100		36±1	2,5±0,1	22
125		49±1	2,0±0,2	57
150		0	0	100
50	“North Country”	54±2	0,9±0,1	44
75		20±3	3,1±0,2	19
100		30±1	2,0±0,3	20
125		43±2	1,9±0,2	36
150		0	0	100

Для инициации геммогенеза отобранных сортов голубики узколистной в качестве регуляторов роста были отобраны такие цитокинины, как 2-изопентиладенин, зеатин, в качестве ауксинов использовалась индолилуксусная кислота, влияние которых на активность морфогенеза вегетативных побегов предшественников рода *Vaccinium* L. было определено ранее [6, 7]. В результате было установлено, что для индукции геммогенеза сорта “North Land” использование концентраций регулятора роста Zea 3 мг/л и 0,3 мг/л позволяет получать до 4,4±0,5 шт. почек на эксплант. Количество метамеров при этом достигает 2,5±0,3 шт. на побег. Для сорта “North Blue” лучшим вариантом

было использование 2-ип в концентрации 3 мг/л совместно с IAA 0,3 мг/л, что позволило получать 3,5±0,2 шт. почек на эксплант и 3,2±0,2 шт. метамеров на побег. Сорт “North Country” проявил лучшие ростовые характеристики при использовании Zea в концентрации 2 мг/л и индолилуксусной кислоты 0,2 мг/л. В этом варианте на эксплантах образовывались почки в количестве 2,7±0,3 шт. на эксплант и 3,0±0,4 шт. метамеров на побег (табл. 2).

Нужно отметить, что для любых сортов голубики узколистной использование зеатина и 2-изопентиладенина приводит к положительным результатам, использование иных цитокининов нежелательно.

Таблица 2. Влияние 2-изопентиладенина и зеатина совместно с индолилуксусной кислотой на активность морфогенеза сортов голубики узколистной (питательная среда WPM, сахара 20 г/л; pH 4,0-4,5)

Table 2. The effect of 2-isopentyladenine and zeatin in combination with indoleacetic acid on the activity of morphogenesis of *Vaccinium angustifolium* Aiton varieties (WPM nutrient medium, sucrose 20 g/l; pH 4.0-4.5)

Регуляторы роста, мг/л	Число почек на эксплант, шт.		Число метамеров, шт.	
	M±SEM	Cv, %	M±SEM	Cv, %
Сорт “North Land”				
2-ип 1 + IAA 0,1	1,2±0,2	3,5	1,1±0,2	4,6
2-ип 2 + IAA 0,2	1,7±0,5	6,7	1,4±0,3	6,3
2-ип 3 + IAA 0,3	3,4±0,3	6,2	2,2±0,2	5,9
2-ип 4 + IAA 0,4	1,3±0,2	3,1	1,8±0,4	87
ZEA1 + IAA 0,1	1,0±0,2	4,7	1,0±0,1	3,7
ZEA2 + IAA 0,2	1,2±0,2	6,5	1,4±0,1	5,6
ZEA3 + IAA 0,3	4,4±0,5	4,2	2,5±0,3	2,5
ZEA4 + IAA 0,4	3,4±0,2	2,5	1,4±0,3	4,2
Сорт “North Blue”				
2-ип 1 + IAA 0,1	1,9±0,2	7,3	1,2±0,2	6,5
2-ип 2 + IAA 0,2	2,4±0,2	4,4	1,4±0,3	7,6
2-ип 3 + IAA 0,3	3,5±0,2	5,1	3,2±0,2	10,0
2-ип 4 + IAA 0,4	1,4±0,2	7,8	2,8±0,3	1,2
Zea1 + IAA 0,1	1,4±0,2	7,8	2,8±0,3	1,2
Zea2 + IAA 0,2	1,0±0,2	5,7	1,3±0,2	3,2
Zea3 + IAA 0,3	1,7±0,3	3,6	1,5±0,6	9,3
Zea4 + IAA 0,4	2,5±0,4	4,6	2,0±0,1	1,9
Сорт “North Country”				
2-ип 1 + IAA 0,1	1,8±0,2	12,0	1,0±0,3	5,0
2-ип 2 + IAA 0,2	2,0±0,4	5,6	1,2±0,2	8,4
2-ип 3 + IAA 0,3	2,0±0,2	12,1	2,1±0,2	4,3
2-ип 4 + IAA 0,4	2,1±0,3	4,3	2,0±0,1	4,7
Zea1 + IAA 0,1	1,7±0,2	5,3	2,1±0,2	7,1
ZEA2 + IAA 0,2	2,7±0,3	2,0	3,0±0,4	2,0
Zea3 + IAA 0,3	2,5±0,1	6,7	1,8±0,3	5,2
Zea4 + IAA 0,4	2,1±0,5	3,4	1,7±0,4	4,4

Работу с генеративными тканями мы разделили на два этапа. На первом этапе мы оценивали влияние различных концентраций макроэлементов на продолжительность жизнеспособности тканей пыльника, которая легко определяется как по окраске тканей, так и по разрастанию тканей тычинки (если она осталась после извлечения пыльника). В результате нами было установлено, что свою жизнеспособность у всех трёх сортов пыльники дольше сохраняют на питательной среде с повышенным до 125 % от прописи содержанием макроэлементов (табл. 3). Таким образом, нам удалось выявить стимулирующее жизнеспособность тканей пыльника воздействие повышенной дозы макроэлементного состава питательной среды WPM, которое в дальнейшем можно использовать для получения эмбриоидов в культуре генеративных тканей данных сортов.

На втором этапе питательную среду с повышенным содержанием макроэлементов дополняли регулятором роста, который наиболее часто используется для активации переключения развития микроспор с гаметофитной на спорофитную программу развития – 2,4-D. В литературе описан по-

ложительный опыт использования данного регулятора роста для активации эмбриодогенеза ряда культур (*Arabidopsis*, *Serenoa repens*), что, вероятно, обуславливается его положительным стрессовым воздействием на ткани [13]. Однако в данном случае необходимо подобрать оптимальную концентрацию регулятора роста, являющуюся повышенной для генеративной ткани культуры, но не влияющую на снижение жизнеспособности эксплантов. В результате было установлено, что для активации переключения программы развития микроспор с гаметофитной на спорофитную для сортов “North Land” и “North Country” из предложенных концентраций регулятора роста лучше использовать 1 мг/л, а для сорта “North Blue” оптимальнее использовать 1,5 мг/л (табл. 4, рис. 3). Полученные нами данные свидетельствуют о негативном стрессовом воздействии повышенных концентраций ауксина 2,4-D на эмбриогенез генеративных тканей сортов рода *Vaccinium*: при концентрациях от 1,5 мг/л у сортов “North Land” и “North Country” и от 2,0 мг/л у сорта “North Blue” не было зафиксировано появление эмбриоидов.

Таблица 3. Влияние концентрации макроэлементов на жизнеспособность пыльников у трёх сортов голубики узколистной (сахароза 20 г/л; pH 4,0-4,5, регуляторы роста отсутствуют)

Table 3. The influence of the concentration of macroelements on the viability of anthers in three varieties of *Vaccinium angustifolium* Ait. (sucrose 20 g/l; pH 4.0-4.5, no growth regulators)

Концентрация макроэлементов в питательной среде WPM, %	Жизнеспособность тканей пыльника, сутки	
	M±SEM	Cv, %
Сорт “North Land”		
150	38±3	2,4
125	47±2	4,4
100	40±1	4,8
75	32±1	4,9
50	25±3	9,0
Сорт “North Blue”		
150	40±3	3,7
125	53±2	5,3
100	44±2	9,2
75	36±2	11,2
50	20±1	6,3
Сорт “North Country”		
150	27±1	3,5
125	50±2	4,3
100	37±2	6,8
75	33±3	9,2
50	19±2	8,3

Таблица 4. Влияние различных концентраций 2,4-D на способность переключения с гаметофитной программы развития микроспоры на спорофитную (питательная среда WPM, сахароза 20 г/л; pH 4,0-4,5)

Table 4. The effect of various concentrations of 2,4-D on the ability to switch from the gametophytic program of microspore development to the sporophytic one (WPM nutrient medium, sucrose 20 g/l; pH 4.0-4.5)

Концентрация 2,4-D, мг/л	Появление эмбрионов, сутки		Число эмбрионов на 60-е сутки, шт.	
	M±SEM	Cv, %	M±SEM	Cv, %
Сорт "North Land"				
0,5	69±2,3	5,8	12±1,2	4,2
1,0	55±1,2	6,9	23±2,4	5,3
1,5	-	-	-	-
2,0	-	-	-	-
Сорт "North Blue"				
0,5	53±3	5,2	7±3,1	4,3
1,0	50±1	10,2	11±4,2	5,3
1,5	46±1,3	6,3	22±1,5	6,1
2,0	-	-	-	-
Сорт "North Country"				
0,5	67±5	7,2	4±1,3	5,5
1,0	49±4	4,5	18±2,5	7,9
1,5	-	-	-	-
2,0	-	-	-	-



Рис. 3. Эмбриогенез на пыльнике голубики сорта "North Country"

Fig. 3. Embryoidogenesis on the anther of the 'North Country' variety of *Vaccinium angustifolium* Aiton

Заключение

В статье обозначены особенности морфогенеза и развития тканей вегетативных и генеративных структур сортовых форм голубики узколистной ("North Country", "North Land" и "North Blue"), выражающиеся в активности процессов геммогенеза и эмбриогенеза эксплантов при культивировании на питательных средах с различной кратностью макроэлементного состава от прописи WPM и содержанием регуляторов роста.

Выявлена дозозависимая активность процессов геммогенеза и эмбриогенеза

рассматриваемых сортов в зависимости от макроэлементного состава питательной среды и содержания концентраций Zea и 2-ip в случае побегообразования вегетативных тканей и 2,4-D при образовании эмбрионов. Установлено, что морфогенез вегетативных тканей сорта "North Country" наиболее оптимален на питательной среде 75 % WPM; активность морфогенеза максимальна для "North Country" и "North Land" при добавлении Zea 2 мг/л и 3 мг/л соответственно, для "North Blue" – 2-ip 3 мг/л. Выявлены различия морфогенеза генеративных тканей сортов голубики уз-

колистной в зависимости от концентраций 2,4-D, выражающиеся в активности эмбриогенеза эксплантов. Наиболее выраженное появление эмбриоидов в культуре пыльников отмечено при концентрациях 2,4-D от 1,0 мг/л (сорта “North Country” и “North Land”) до 1,5 мг/л (сорт “North Blue”) питательной среды.

Данное исследование вносит вклад в изучение особенностей активации переключения программы развития микроспор с гаметофитной на спорофитную при дозозависимом воздействии ауксина 2,4-D и повышенном содержании макроэлементного состава WPM (до 125 %) на примере сортов голубики узколистной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Blueberries Around the Globe – Past, Present, and Future. International Agricultural Trade Report. Foreign Agricultural Service, U.S. Department of Agriculture. 2021. 6 p. URL: https://www.fas.usda.gov/sites/default/files/2021-10/GlobalBlueberriesFinal_1.pdf (дата обращения: 10.11.2023).

2. Masłowska W., Liberacki D. The yield of selected varieties of American Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) in the first years of fruiting in the western part of Poland // *Acta Horticulturae et Regio-lecturae*. 2018. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 13–16. DOI: 10.2478/ahr-2018-0004

3. Song G.-Q., Hancock J. F. *Vaccinium* // *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. Pp. 197–221. DOI: 10.1007/978-3-642-16057-8_10

4. On the Developmental and Environmental Regulation of Secondary Metabolism in *Vaccinium* spp. Berries / K. Karppinen, L. Zoratti, N. Nguyenquynh et al. // *Frontiers in Plant Science*. 2016. Vol. 7. Art. 655. DOI: 10.3389/fpls.2016.00655

5. There and back again; historical perspective and future directions for *Vaccinium* breeding and research studies / P. Edger, M. Iorizzo, N. Bassil et al. // *Horticulture Research*. 2022. Vol. 9. Art. uhac083. DOI: 10.1093/hr/uhac083

6. Влияние состава питательных сред и регуляторов роста при клональном микроразмножении некоторых полиплоидных форм рода *Vaccinium* L. / Д. Н. Зонтиков, С. А. Зонтикова, К. В. Малахова и др. // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2019. Т. 21. № 2. С. 39–44. EDN: BZEBNA

7. Microclonal propagation of *Vaccinium* sp. and *Rubus* sp. and detection of genetic variability in cul-

ture in vitro / A. Gajdošová, M. G. Ostrolucká, G. Li- biaková et al. // *Journal of fruit and ornamental plant research*. 2006. Vol. 14. Iss. 1. Pp. 103–119. Corpus ID: 82698159

8. Longin C. F. H., Utz H. F., Reif J. C. Hybrid maize breeding with doubled haploids: III. Efficiency of early testing prior to doubled haploid production in two-stage selection for testcross performance // *Theoretical and Applied Genetics*. 2007. Vol. 115. Pp. 519–527. DOI: 10.1007/s00122-007-0585-2

9. Thomas W. T. B., Forster B. P., Gertsson B. Doubled haploids in breeding // *Doubled Haploid Production in Crop Plants*. Springer, Dordrecht. 2003. Pp. 337–349. DOI: 10.1007/978-94-017-1293-4_47

10. Lloyd G., McCown B. 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.

11. Hunková J., Gajdošová A., Szabóová M. Effect of Mesos Components (MgSO₄, CaCl₂, KH₂PO₄) on In Vitro Shoot Growth of Blackberry, Blueberry, and Saskatoon // *Plants*. 2020. Vol. 9. Iss. 8. Art. 935. DOI: 10.3390/plants9080935

12. Зонтиков Д. Н., Зонтикова С. А., Сергеев П. В. Размножение высокопродуктивных диплоидных и триплоидных форм осины (*Populus tremula* L.) в культуре in vitro // *Агрехимия*. 2016. № 7. С. 59–65. EDN: WHGKNB

13. Gaj M. D. Factors Influencing Somatic Embryogenesis Induction and Plant Regeneration with Particular Reference to *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. // *Plant Growth Regulation*. 2004. Vol. 43. Iss. 1. Pp. 27–47. DOI: 10.1023/B:GROW.0000038275.29262.fb

Статья поступила в редакцию 06.12.2023; одобрена после рецензирования 19.12.2023; принята к публикации 25.04.2024

Информация об авторах

ЗОНТИКОВ Дмитрий Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Костромской государственной университет. Область научных интересов – культура растительной ткани, клональное микроразмножение растений, гаплоидия, полиплоидия. Автор 57 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6668-4877>; SPIN-код: 1011-5860

МАЛАХОВА Ксения Вячеславовна – младший научный сотрудник, Костромской государственной университет. Область научных интересов – клональное микроразмножение растений, культура растительной ткани, гаплоидия, полиплоидия. Автор 37 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7762-8811>; SPIN-код: 7279-0684

БЕРЕЗИНА Олеся Олеговна – ассистент кафедры биологии и экологии, Костромской государственной университет. Область научных интересов – клональное микроразмножение растений, культура растительной ткани, физиология растений. Автор пяти научных публикаций.

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

Вклад авторов:

Зонтиков Д. Н. – постановка цели, задач.

Малахова К. В. – разработка программы, методики.

Березина О. О. – выполнение экспериментальной работы, написание и подготовка статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 58.085; 634.739.2; 634.738; 634.737

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.20>

EDN: WPJKIX

Influence of the Macroelement Composition of the WPM Medium and Growth Regulators on the Morphogenesis of Vegetative and Generative Tissues of Varietal Forms of *Vaccinium Angustifolium* Ait

D. N. Zontikov[✉], *K. V. Malakhova*, *O. O. Berezina*

Kostroma State University,

17/11, Dzerzhinsky St., Kostroma, 156005, Russian Federation

zontikovdn@mail.ru[✉]

Abstract. Introduction. The high demand of the food manufacturing industry for varietal forms of blueberries necessitates research on the characteristics of tissue culture of the varieties that can both serve as the basis for obtaining new cultivars through breeding and optimize the clonal micropropagation technology for valuable varietal forms of blueberries. Of fundamental importance is the issue of switching the generative tissues of microspores to the sporophytic pathway of development. The key factors determining the activity of morphogenesis of plant tissues in in vitro culture are the content of macroelements and growth regulators in the nutrient medium. The *purpose* of the study is to determine the influence of some macroelements and growth regulators on the morphogenetic activity of vegetative and generative tissues in varieties of *Vaccinium angustifolium* Aiton (lowbush blueberry) in in vitro culture. *Material and research methods.* The article deals with the issues of the tissue culture of vegetative and generative structures of *Vaccinium angustifolium* Ait. varieties ('North Country', 'North Land' and 'North Blue'), as well as the influence of the qualitative and quantitative content of macroelements and plant growth regulators in the nutrient medium on the activity of morphogenesis of vegetative and generative tissues in explants. At the same time, nutrient media containing macroelements at concentrations ranging from 50 to 150 % of the McCown Woody Plant medium (WPM) composition were tested. WPM medium in its original concentration (100 %) was used as a control medium. The growth regulators of 2-isopentyladenine (2-ip) and zeatin (Zea) at concentrations of 1–4 mg/l were tested with the addition of indoleacetic acid (IAA) when working with the vegetative tissues, and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) at a concentration of 0.5–2.5 mg/l when working with the tissues of generative structures. *Results.* The study revealed the specificity of morphogenesis of the vegetative and generative tissues of the studied varieties on the tested media. The activity of morphogenesis of the vegetative tissues of the 'North Land' and 'North Blue' varieties was optimal on the control medium supplemented with 3 mg/l Zea and 3 mg/l 2-ip, respectively. The shoot formation in the 'North Country' variety was the most intensive at 75 % WPM and 2 mg/L Zea. The viability of anther generative tissues was maximum at a concentration of 125 % of the WPM composition for all three varieties. The number of embryoids formed was the greatest with the addition of 1.0 mg/L of 2,4-D for 'North Land' and 'North Country' and 1.5 mg/L of 2,4-D for the 'North Blue' variety. *Conclusion.* The study revealed specific features of activating the switch of the microspore development from the gametophytic to the sporophytic program in *Vaccinium angustifolium* Aiton varieties. The features depend on the concentrations of macroelements in the medium composition and can be controlled by growth regulators.

Keywords: *Vaccinium angustifolium* Aiton; ‘North Country’; ‘North Land’; ‘North Blue’; morphogenesis; hemmogenesis; embryoidogenesis; macronutrients; growth regulators

Funding: the research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-26-20086, <https://rscf.ru/project/22-26-20086/>

For citation: Zontikov D. N., Malakhova K. V., Berezina O. O. Influence of the Macroelement Composition of the WPM Medium and Growth Regulators on the Morphogenesis of Vegetative and Generative Tissues of Varietal Forms of *Vaccinium Angustifolium* Ait. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(2):20–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.20>; EDN: WPJKIX

REFERENCES

1. Blueberries Around the Globe – Past, Present, and Future. International Agricultural Trade Report. Foreign Agricultural Service, U.S. Department of Agriculture. 2021. 6 p. URL: https://www.fas.usda.gov/sites/default/files/2021-10/GlobalBlueberriesFinal_1.pdf (reference date: 10.11.2023).
2. Masłowska W., Liberacki D. The yield of selected varieties of American Blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) in the first years of fruiting in the western part of Poland. *Acta Horticulturae et Regio-ecturae.* 2018;21(1):13–16. DOI: 10.2478/ahr-2018-0004
3. Song G.-Q., Hancock J. F. *Vaccinium*. In: *Wild Crop Relatives: Genomic and Breeding Resources*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. Pp. 197–221. DOI: 10.1007/978-3-642-16057-8_10
4. Karppinen K., Zoratti L., Nguyenquynh N. et al. On the Developmental and Environmental Regulation of Secondary Metabolism in *Vaccinium* spp. Berries. *Frontiers in Plant Science.* 2016;7. Art. 655. DOI: 10.3389/fpls.2016.00655
5. Edger P., Iorizzo M., Bassil N. et al. There and back again; historical perspective and future directions for *Vaccinium* breeding and research studies. *Horticulture Research.* 2022;9. Art. uhac083. DOI: 10.1093/hr/uhac083
6. Zontikov D. N., Zontikova S. A., Malakhova K. V. et al. Influence of the composition of nutrient media and growth regulators during clonal micropropagation of some polyiploid forms of the genus *Vaccinium* L. *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2019;21(2):39-44. (In Russ.). EDN: BZEBNA
7. Gajdošová A., Ostrolucká M. G., Libiaková G. et al. Microclonal propagation of *Vaccinium* sp. and *Rubus* sp. and detection of genetic variability in culture in vitro. *Journal of fruit and ornamental plant research.* 2006;14(1):103–119. Corpus ID: 82698159
8. Longin C. F. H., Utz H. F., Reif J. C. Hybrid maize breeding with doubled haploids: III. Efficiency of early testing prior to doubled haploid production in two-stage selection for testcross performance. *Theoretical and Applied Genetics.* 2007;115:519–527. DOI: 10.1007/s00122-007-0585-2
9. Thomas W. T. B., Forster B. P., Gertsson B. Doubled haploids in breeding. In: *Doubled Haploid Production in Crop Plants*. Springer, Dordrecht. 2003. Pp. 337–349. DOI: 10.1007/978-94-017-1293-4_47
10. Lloyd G., McCown B. Commercially-feasible micropropagation of mountain laurel, *Kalmia latifolia*, by use of shoot-tip culture. *Combined Proceedings, International Plant Propagators' Society.* 1980;30:421–427.
11. Hunková J., Gajdošová A., Szabóová M. Effect of Mesos Components (MgSO₄, CaCl₂, KH₂PO₄) on In Vitro Shoot Growth of Blackberry, Blueberry, and Saskatoon. *Plants.* 2020;9(8). Art. 935. DOI: 10.3390/plants9080935
12. Zontikov D. N., Zontikova S. A., Sergeev R. V. In vitro propagation of the highly diploid and triploid forms of aspen (*Populus tremula* L.). *Agrochemistry.* 2016;(7):59-65. EDN: WHGKNB (In Russ.).
13. Gaj M. D. Factors Influencing Somatic Embryogenesis Induction and Plant Regeneration with Particular Reference to *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. *Plant Growth Regulation.* 2004;43(1):27–47. DOI: 10.1023/B:GROW.0000038275.29262.fb

The article was submitted 06.12.2023; approved after reviewing 19.12.2023; accepted for publication 25.04.2024

Information about the authors

Dmitry N. Zontikov – Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher, Kostroma State University. Research interests – plant tissue culture, clonal micropropagation of plants, haploidy, polyploidy. Author of 66 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6668-4877>; SPIN: 1011-5860

Ksenia V. Malakhova – Junior Researcher, Kostroma State University. Research interests – clonal micropropagation of plants, plant tissue culture, haploidy, polyploidy. Author of 46 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7762-8811>; SPIN: 7279-0684

Olesya O. Berezina – Assistant at the Department of Biology and Ecology, Kostroma State University. Research interests – clonal micropropagation of plants, plant tissue culture, plant physiology. Author of five scientific publications.

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

Contribution of the authors:

Zontikov D. N. – formulation of the research goal and objectives.

Malakhova K. V. – development of the program and methodology.

Berezina O. O. – carrying out experimental work, manuscript writing and preparation.

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

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 635.92+582.477.2

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.31>

EDN: GJDJNV

Пигментный состав хвои декоративных форм и сортов туи западной (*Thuja occidentalis*) в условиях Нижегородской области

М. Ю. Котынова, А. И. Ханявин, Н. Н. Бессчётнова, В. П. Бессчётнов✉

Нижегородский государственный агротехнологический университет,

Российская Федерация, 603107, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 97

lesfak@bk.ru✉

Аннотация. *Введение.* Проблема формирования ассортиментного состава озеленительных насаждений современных городов тесно перекликается с острой потребностью в стабилизации экологических параметров среды урбанизированных территорий. В состав городских насаждений включают представителей инорайонной флоры. К их числу относят тую западную (*Thuja occidentalis* L.), сорта и формы которой используют в защитных, мелиоративных и озеленительных насаждениях. *Цель* исследований – сравнительная оценка декоративных форм и сортов туи западной по показателям пигментного состава хвои при их введении в городские насаждения на территории Нижегородской области. *Объекты и методы* исследований. Объектами исследований служили девять сортов и типичная форма туи западной, размещённые на одном опытном участке дендрария Нижегородского ГАТУ. Соблюдали принципы единственного логического различия, типичности, пригодности, целесообразности и надёжности опыта. Использовали одновозрастные растения вегетативного происхождения при их общем числе 30 шт. С них одновременно срезали по пять однотипных одновозрастных побегов в одинаковом фенологическом состоянии, без признаков повреждения биотическими и абиотическими факторами и отклонений от нормального развития. Пластидные пигменты выявляли спектрофотометром СФ-2000 с программным обеспечением GRASS GIS 7.6.1 / QGIS 3.4. *Результаты.* Сорта и формы туи западной неоднородны в оценках пигментного состава хвои, что наблюдалось как в начале, так и в конце вегетационного периода. По содержанию хлорофилла-а в весенний период наибольшая оценка соответствовала сорту 'Mr. Bowling Ball' ($2,51 \pm 0,06$ мг/г), а наименьшая – сорту 'Sunkist' ($0,39 \pm 0,05$ мг/г). Осенью его наибольшее количество ($3,16 \pm 0,02$ мг/г) зафиксировано у сорта 'Danica', а наименьшее ($1,81 \pm 0,03$ мг/г) – у сорта 'Rheingold'. Дисперсионный анализ подтвердил наследственную обусловленность отмеченных различий для каждого срока учёта. *Выводы.* В условиях интродукции в Нижегородскую область пигментный состав хвои декоративных сортов и типичной формы туи западной сезонно нестабилен и подвержен значительным изменениям содержания и соотношения хлорофилла и каротиноидов в начале и в конце вегетационного периода, при том, что в осенний период их концентрация повышается.

Ключевые слова: интродукция; пластидные пигменты; хлорофилл; каротиноиды; изменчивость; наследственная обусловленность

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Котынова М. Ю., Ханявин А. И., Бессчётнова Н. Н., Бессчётнов В. П. Пигментный состав хвои декоративных форм и сортов туи западной (*Thuja occidentalis*) в условиях Нижегородской области // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 31–45. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.31>; EDN: GJDJNV

Введение.

Проблема формирования оптимального ассортимента состава озеленительных насаждений современных городов тесно перекликается с острой потребностью в стабилизации экологических параметров среды урбанизированных территорий. На текущий момент они не могут быть признаны соответствующими действующим санитарным нормам, а городской пейзаж зачастую нуждается в серьёзном улучшении. Универсальным инструментом в решении указанных задач повсеместно признаны насаждения из деревьев и кустарников, которые эффективно выполняют санитарно-гигиенические, декоративно-эстетические и рекреационно-бальнеологические функции. При этом в состав таких объектов городской инфраструктуры нередко включают наиболее ценных представителей инорайонной флоры. Особую роль здесь играют хвойные виды, сохраняющие свою листовую массу и в зимний период. К их числу с полным основанием можно причислить тую западную (*Thuja occidentalis* L.), многочисленные сорта и декоративные формы которой находят применение в создании защитных, мелиоративных и озеленительных насаждений [1–5]. Наличие достаточного объёма данных об особенностях биологии последних, доступность информации о потенциале семенной репродукции и регенерационной способности в новых местообитаниях может способствовать полномасштабному вовлечению их в хозяйственный оборот, в связи с чем весьма актуальны работы в указанном направлении [6–8]. Резистентность, экологическая пластичность и достигнутый уровень адаптированности экзотов в местах расселения во многом обуславливают успех интродукционных мероприятий. В частности, это предопределяет возможности расширения границ территориального распространения перспективных форм и сортов туи западной в культуре и создаёт предпосылки для диверсификации форм их практического применения

в Среднем Поволжье и Нижегородской области.

Цель работы – сравнительная оценка декоративных форм и сортов туи западной по основным показателям пигментного состава хвои при их введении в городские насаждения на территории Нижегородской области.

Объекты и методы исследования

Объектами исследований служили девять декоративных форм и сортов туи западной, краткая морфологическая характеристика листового аппарата которых приведена ниже:

– *Thuja occidentalis* f. 'Golden Smaragd' характеризуется желтовато-зелёной хвоей с интенсивно окрашенными яркими золотистыми кончиками;

– *Thuja occidentalis* f. 'Rheingold' с ярко-жёлтой хвоей, на фоне которой хорошо заметны молодые приросты с оранжевым оттенком;

– *Thuja occidentalis* f. 'Danica' имеет густую чешуевидную хвою зелёной блестящей окраски, которая зимой практически не меняет цвет или становится коричневатозелёной;

– *Thuja occidentalis* f. 'Golden Globe', обладающая золотисто-зелёной окраской хвои, которая с наступлением холодов приобретает бурый оттенок;

– *Thuja occidentalis* f. 'Sunkist', чешуевидная хвоя которой в период активного роста приобретает золотисто-зелёный цвет, затем становится ярко-жёлтой, а в конце осени – бронзовой;

– *Thuja occidentalis* f. 'Yellow ribbon' с золотисто-жёлтой в течение лета хвоей, приобретающей оранжево-коричневатые оттенки в конце вегетационного периода;

– *Thuja occidentalis* f. 'Mr. Bowling Ball' с тёмно-зелёной летней хвоей, приобретающей в конце вегетационного периода и зимой лёгкий бронзовый оттенок;

– *Thuja occidentalis* f. 'Mirjam' – хвоя чешуевидная, яркая светло-золотистожёлтая, блестящая, зимой приобретает бронзовый оттенок;

– *Thuja occidentalis* f. 'Tiny Tim' с густой чешуевидной, ярко-зелёной блестящей хвоей, которая в конце осени и зимой приобретает коричневатый оттенок.

Контролем (базой сравнения) выступала типичная форма туи западной (*Thuja occidentalis* L. f.), особи которой имели сопоставимый возраст и такое же, как в вариантах опыта, вегетативное происхождение. Её чешуевидная хвоя имеет интенсивную средне-зелёную окраску, изменяющуюся на буро-зелёную в конце осени. Отмеченная особенность динамики сезонного состояния большинства известных форм и сортов туи западной легла в основу выдвижения гипотезы о нестабильном во временном аспекте характере пигментного состава их хвои. В организационно-методической схеме опыта каждый из перечисленных форм и сортов представлен в трёхкратной повторности. Все вошедшие в схему опыта растения были расположены в пределах одного опытного участка на территории дендрария Нижегородского ГАТУ. Согласно современной системе лесорастительного районирования его территория входит в зону хвойно-широколиственных лесов и отнесена к району хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации. Регион характеризуется влажным климатом с умеренно тёплым и влажным летом и умеренно суровой снежной зимой. В нём распространены серые лесные, а также дерново-подзолистые и подзолистые почвы, в силу чего лесорастительные условия признаются вполне благоприятными для успешного произрастания обширного перечня видов хвойных деревьев и кустарников, включая интродуцентов, в числе которых туя западная [9]. В работе соблюдали базовые требования к организации опыта: типичность, пригодность, целесообразность, надёжность, принцип единственного логического различия. Ввиду указанных обстоятельств в лабораторных исследованиях использованы одновозрастные растения

вегетативного происхождения при их общем числе 30 шт. С каждого из них одновременно срезали по пять однотипных одновозрастных побегов, находящихся в одинаковом фенологическом состоянии и не имеющих признаков повреждения биотическими и абиотическими факторами или отклонений от нормального развития. Местом заготовки являлся средний ярус периферии хорошо освещённого участка кроны. Объединённая хвоя с каждого из них служила исходным материалом для приготовления экстракционной навески. Их общее число в однократном учёте составило 150 шт. Анализ повторяли в начале (07.05.2019 г.) и в конце (10.10.2019 г.) вегетационного периода, что позволило сформировать массивы, содержащие по 150 единиц учётов каждого признака, и единую базу данных из 1 950 дата-единиц. Её статистическую обработку, включая дисперсионный анализ, выполняли по общепринятым алгоритмам.

В основу проведения исследований легли имеющиеся фундаментальные разработки по пигментному составу листового аппарата растений [10–13]. Согласно им выявляли наличие в хвое хлорофилла-*a*, хлорофилла-*b*, их суммарное количество и концентрацию каротиноидов. В этих целях был реализован спектрофотометрический метод их количественного определения [14–16]. Его теоретической платформой выступает оценка содержания пигментов по оптической плотности экстракционной вытяжки. Использовали спектрофотометр СФ-2000 с программным обеспечением GRASS GIS 7.6.1 / QGIS 3.4, которое позволяло визуализировать спектры поглощения указанных веществ на мониторе компьютера. Значения максимумов поглощения хлорофилла-*a*, хлорофилла-*b* и каротиноидов на полученных в указанном порядке графиках фиксировали при длинах волн: 665, 649, 452,5 нм соответственно. Принимая во внимание возможность некоторого смещения максимумов в зависимости от оптических

свойств используемого экстрагента [17–19], готовили его эталон. Вычисление концентрации указанных веществ в мг/г сырой массы хвои вели по уравнениям Ветштгейна и Хольма для оптически чистого 100 % ацетона и для 96 % этанола [15, 17, 19]. Навеску калибровали с точностью до 0,001 г на прецизионных аналитических весах VIC-300d3. Содержание пигментов на единицу массы сухого вещества вычисляли с определением его доли в каждой навеске после высушивания хвои до абсолютно сухого состояния в шкафах HS 61 A [20–22]. Расчётным путём последовательно находили отношение содержания разных форм хлорофилла; отношение содержания хлорофилла-*a* и содержания хлорофилла-*b* к содержанию каротиноидов, их долю в пигментном составе и общее количество пигментов. Принятый подход традиционен в исследованиях пигментного состава фотосинтезирующего аппарата [13, 18, 22].

Результаты и их обсуждение

Сравниваемые между собой декоративные сорта и формы туи западной неоднородны в оценках пигментного состава хвои, что отчётливо наблюдалось как в начале, так и в конце вегетационного периода (табл. 1–6). Так, по содержанию хлорофилла-*a* (см. табл. 1) в клетках хвои в весенний период сорта туи западной демонстрировали неоднородность своих оценок, наибольшая из которых соответствовала сорту 'Mr. Bowling Ball' ($2,51 \pm 0,06$ мг/г), а наименьшая – сорту 'Sunkist' ($0,39 \pm 0,05$ мг/г). Превышение первой над второй составило 2,11 мг/г, или в 6,35 раза. Типичная форма (контроль), показав наличие этого пигмента в количестве $1,80 \pm 0,03$ мг/г, превысило обобщённое по всему массиву значение (Total) $1,29 \pm 0,06$ мг/г на 0,51 мг/г, или в 1,40 раза. При этом отношение абсолютных лимитов в данный срок учёта принципиально больше – в 24,06 раза.

Таблица 1. Содержание хлорофилла-*a* в клетках хвои туи западной
Table 1. Chlorophyll-*a* content in the cells of Western thuja needles

Сорт, форма (вариант опыта)	Среднее, мг/г	Максимум, мг/г	Минимум, мг/г	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
Весна (первый срок учёта): 07.05.2019 г.					
'Golden Smaragd'	$0,77 \pm 0,10$	1,30	0,19	49,07	12,67
'Rheingold'	$0,58 \pm 0,05$	0,80	0,12	34,51	8,91
'Danica'	$1,64 \pm 0,13$	2,60	0,87	31,83	8,22
'Golden Globe'	$1,00 \pm 0,13$	1,61	0,26	48,40	12,50
'Sunkist'	$0,39 \pm 0,05$	0,69	0,13	48,74	12,59
'Yellow ribbon'	$0,99 \pm 0,04$	1,35	0,78	15,97	4,12
'Mr. Bowling Ball'	$2,51 \pm 0,06$	2,97	2,10	8,69	2,24
'Mirjam'	$1,46 \pm 0,05$	1,84	1,18	13,81	3,57
'Tiny Tim'	$1,72 \pm 0,04$	2,00	1,48	8,42	2,17
Контроль	$1,80 \pm 0,03$	2,07	1,70	5,62	1,45
Total	$1,29 \pm 0,06$	2,97	0,12	53,11	4,34
Осень (второй срок учёта): 10.10.2019 г.					
'Golden Smaragd'	$2,10 \pm 0,02$	2,22	1,90	4,25	1,10
'Rheingold'	$1,81 \pm 0,03$	1,94	1,55	6,14	1,59
'Danica'	$3,16 \pm 0,02$	3,25	3,01	2,59	0,67
'Golden Globe'	$2,89 \pm 0,13$	3,34	2,07	17,46	4,51
'Sunkist'	$1,91 \pm 0,02$	2,03	1,69	4,89	1,26
'Yellow ribbon'	$2,04 \pm 0,02$	2,19	1,92	3,87	1,00
'Mr. Bowling Ball'	$2,85 \pm 0,05$	3,09	2,56	6,68	1,72
'Mirjam'	$1,84 \pm 0,05$	2,09	1,46	9,46	2,44
'Tiny Tim'	$2,28 \pm 0,05$	2,59	1,94	8,85	2,28
Контроль	$1,94 \pm 0,07$	2,50	1,61	13,58	3,51
Total	$2,28 \pm 0,04$	3,34	1,46	22,73	1,86

Сорта продемонстрировали неодинаковые темпы накопления зелёных пигментов в течение лета, и осенью соотношение между ними по содержанию хлорофилла-*a* изменилось. Его наибольшее количество ($3,16 \pm 0,02$ мг/г) зафиксировано у сорта 'Danica', а наименьшее ($1,81 \pm 0,03$ мг/г) – у сорта 'Rheingold'. В этот период превышение большей оценки над меньшей составило $1,35$ мг/г, или в $1,75$ раза. В целом, на завершающем этапе вегетационного периода произошло некоторое повышение концентрации хлорофилла-*a* в тканях хвои исследуемых растений, притом что различия в их характеристиках несколько сгладились.

По содержанию в клетках хвои хлорофилла-*b* (см. табл. 2) сорта туи западной также неоднородны, и в начале вегетационного периода принципиально большее его количество ($1,37 \pm 0,04$ мг/г) наблюдалось у сорта 'Mr. Bowling Ball', в то время как минимум ($0,25 \pm 0,04$ мг/г) – у сорта

'Rheingold'. Разница этих оценок составила $1,12$ мг/г, что создало превышение в $5,48$ раза. Как и по хлорофиллу-*a*, в хвое типичной формы хлорофилла-*b* содержалось больше, чем в обобщённом по всему опыту варианту: $0,75 \pm 0,01$ и $0,62 \pm 0,03$ мг/г соответственно. В завершающей фазе сезонного развития у представителей группы сортов хлорофилл-*b* в большем количестве был накоплен у сорта 'Mr. Bowling Ball' ($0,85 \pm 0,03$ мг/г), однако, типичная форма туи значительно опережала его в этом отношении ($1,88 \pm 0,05$ мг/г). Минимальная оценка ($0,21 \pm 0,01$ мг/г), принадлежащая сорту 'Golden Smaragd', в $9,11$ раза, или на $1,67$ мг/г меньше показателя типичной формы. Расхождения в обобщённых оценках каждого срока сезонного учёта практически полностью отсутствуют: $0,62 \pm 0,03$ мг/г (весной) и $0,62 \pm 0,04$ мг/г (осенью). Это указывает на сезонно стабильный характер данного показателя.

Таблица 2. Содержание хлорофилла-*b* в клетках хвои туи западной
Table 2. Chlorophyll-*b* content in the cells of Western thuja needles

Сорт, форма (вариант опыта)	Среднее, мг/г	Максимум, мг/г	Минимум, мг/г	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
Весна (первый срок учёта): 07.05.2019 г.					
'Golden Smaragd'	$0,27 \pm 0,03$	0,45	0,06	49,41	12,76
'Rheingold'	$0,25 \pm 0,04$	0,66	0,05	65,51	16,91
'Danica'	$0,96 \pm 0,10$	1,64	0,37	40,04	10,34
'Golden Globe'	$0,43 \pm 0,05$	0,79	0,11	45,65	11,79
'Sunkist'	$0,27 \pm 0,04$	0,56	0,06	62,29	16,08
'Yellow ribbon'	$0,50 \pm 0,02$	0,64	0,33	17,13	4,42
'Mr. Bowling Ball'	$1,37 \pm 0,04$	1,64	1,08	10,57	2,73
'Mirjam'	$0,54 \pm 0,03$	0,76	0,37	22,06	5,70
'Tiny Tim'	$0,83 \pm 0,03$	1,05	0,67	13,56	3,50
Контроль	$0,75 \pm 0,01$	0,87	0,66	7,61	1,96
Total	$0,62 \pm 0,03$	1,64	0,05	62,32	5,09
Осень (второй срок учёта): 10.10.2019 г.					
'Golden Smaragd'	$0,21 \pm 0,01$	0,01	0,28	0,12	27,14
'Rheingold'	$0,47 \pm 0,01$	0,01	0,52	0,43	5,87
'Danica'	$0,54 \pm 0,02$	0,02	0,76	0,40	14,77
'Golden Globe'	$0,43 \pm 0,01$	0,01	0,49	0,35	9,16
'Sunkist'	$0,29 \pm 0,02$	0,02	0,38	0,20	21,06
'Yellow ribbon'	$0,49 \pm 0,02$	0,02	0,61	0,39	14,55
'Mr. Bowling Ball'	$0,85 \pm 0,03$	0,03	1,00	0,69	11,88
'Mirjam'	$0,46 \pm 0,02$	0,02	0,57	0,36	14,18
'Tiny Tim'	$0,56 \pm 0,02$	0,02	0,75	0,43	15,56
Контроль	$1,88 \pm 0,05$	0,05	2,13	1,57	9,56
Total	$0,62 \pm 0,04$	0,04	2,13	0,12	74,78

Суммарное количество зелёных пигментов в хвое анализируемых растений (см. табл. 3) отражало основные тенденции в их соотношении, связанные с присутствием в тканях листового аппарата хлорофилла-*a* (см. табл. 1) и хлорофилла-*b* (см. табл. 2).

В весенний период больше всего они накапливались в хвое сорта 'Mr. Bowling Ball' ($3,88 \pm 0,09$ мг/г), а меньше – у сорта 'Sunkist' ($0,67 \pm 0,08$ мг/г). Разница в этом случае достигла $3,21$ мг/г, или в $5,80$ раза. Наличие указанных пигментов в хвое типичной формы ($2,55 \pm 0,04$ мг/г) также превышало их обобщённую оценку ($1,91 \pm 0,09$ мг/г). При осеннем учёте суммы хлорофиллов в хвое группы сортов лидировали 'Danica' ($3,70 \pm 0,04$ мг/г) и 'Mr. Bowling

Ball' ($3,70 \pm 0,07$ мг/г), замыкал их список сорт 'Sunkist' ($2,20 \pm 0,04$ мг/г). Типичная форма продемонстрировала самую высокую оценку ($3,83 \pm 0,10$), которая превосходила минимальное среднее в $1,74$ раза, или на $1,63$ мг/г, и была больше обобщённого значения ($2,90 \pm 0,06$ мг/г) в $1,32$ раза, или на $0,93$ мг/г. Ранее отмеченная тенденция к увеличению количества пигментов в конце вегетационного периода также сохранилась.

Анализ участия каротиноидов в формировании пигментного состава хвои вскрыл неоднородность сравниваемых сортов в этом отношении, что, как и по хлорофиллу-*a*, в той или иной мере проявилось в начале и в конце вегетационного периода (см. табл. 4).

Таблица 3. Суммарное содержание хлорофилла-*a* и хлорофилла-*b* в хвое туи западной
Table 3. Total chlorophyll-*a* and chlorophyll-*b* content in Western thuja needles

Сорт, форма (вариант опыта)	Среднее, мг/г	Максимум, мг/г	Минимум, мг/г	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
Весна (первый срок учёта): 07.05.2019 г.					
'Golden Smaragd'	$1,04 \pm 0,13$	1,75	0,26	48,84	12,61
'Rheingold'	$0,83 \pm 0,09$	1,38	0,18	40,15	10,37
'Danica'	$2,60 \pm 0,22$	4,01	1,24	33,18	8,57
'Golden Globe'	$1,43 \pm 0,17$	2,41	0,37	46,96	12,13
'Sunkist'	$0,67 \pm 0,08$	1,23	0,23	48,57	12,54
'Yellow ribbon'	$1,50 \pm 0,06$	1,98	1,11	15,50	4,00
'Mr. Bowling Ball'	$3,88 \pm 0,09$	4,61	3,18	9,28	2,39
'Mirjam'	$2,01 \pm 0,08$	2,60	1,57	15,78	4,07
'Tiny Tim'	$2,55 \pm 0,07$	3,04	2,15	9,92	2,56
Контроль	$2,55 \pm 0,04$	2,94	2,36	5,95	1,54
Total	$1,91 \pm 0,09$	4,61	0,18	55,11	4,50
Осень (второй срок учёта): 10.10.2019 г.					
'Golden Smaragd'	$2,31 \pm 0,03$		2,47	2,04	5,59
'Rheingold'	$2,28 \pm 0,03$	0,03	2,42	1,98	5,60
'Danica'	$3,70 \pm 0,04$	0,04	3,99	3,44	3,82
'Golden Globe'	$3,32 \pm 0,14$	0,14	3,79	2,42	16,02
'Sunkist'	$2,20 \pm 0,04$	0,04	2,38	1,89	6,29
'Yellow ribbon'	$2,52 \pm 0,03$	0,03	2,80	2,34	5,23
'Mr. Bowling Ball'	$3,70 \pm 0,07$	0,07	3,91	3,27	7,01
'Mirjam'	$2,30 \pm 0,06$	0,06	2,59	1,88	9,46
'Tiny Tim'	$2,83 \pm 0,07$	0,07	3,25	2,46	9,24
Контроль	$3,83 \pm 0,10$	0,10	4,48	3,33	9,76
Total	$2,90 \pm 0,06$	0,06	4,48	1,88	23,70

Таблица 4. Содержание каротиноидов в клетках хвои туи западной
Table 4. Carotenoid content in the cells of Western thuja needles

Сорт, форма (вариант опыта)	Среднее, мг/г	Максимум, мг/г	Минимум, мг/г	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
Весна (первый срок учёта): 07.05.2019 г.					
'Golden Smaragd'	0,19±0,02	0,32	0,05	49,02	12,66
'Rheingold'	0,25±0,02	0,35	0,04	36,37	9,39
'Danica'	0,23±0,02	0,39	0,12	33,24	8,58
'Golden Globe'	0,24±0,02	0,33	0,07	37,40	9,66
'Sunkist'	0,17±0,01	0,27	0,07	29,13	7,52
'Yellow ribbon'	0,20±0,01	0,26	0,16	14,73	3,80
'Mr. Bowling Ball'	0,33±0,01	0,38	0,30	6,75	1,74
'Mirjam'	0,35±0,01	0,43	0,32	9,87	2,55
'Tiny Tim'	0,27±0,01	0,33	0,25	7,33	1,89
Контроль	0,29±0,01	0,34	0,26	7,23	1,87
Total	0,25±0,01	0,43	0,04	32,24	2,63
Осень (второй срок учёта): 10.10.2019 г.					
'Golden Smaragd'	0,64±0,01	0,67	0,61	3,49	0,90
'Rheingold'	0,51±0,01	0,58	0,37	9,80	2,53
'Danica'	0,88±0,01	0,99	0,80	4,77	1,23
'Golden Globe'	0,83±0,04	1,00	0,57	19,41	5,01
'Sunkist'	0,60±0,01	0,66	0,54	6,80	1,76
'Yellow ribbon'	0,54±0,01	0,61	0,50	5,98	1,54
'Mr. Bowling Ball'	0,81±0,04	1,04	0,64	16,99	4,39
'Mirjam'	0,46±0,01	0,52	0,37	9,64	2,49
'Tiny Tim'	0,53±0,02	0,65	0,33	15,84	4,09
Контроль	0,82±0,05	1,12	0,38	22,10	5,71
Total	0,66±0,01	1,12	0,33	26,77	2,19

В весеннем учёте преимущество в рассматриваемой пигментации принадлежало сорту 'Mirjam' (0,35±0,01 мг/г), а наименьшее количество каротиноидов имел сорт 'Sunkist' (0,17±0,01 мг/г). Их сопоставление дало разность в 0,18 мг/г и создало превышение в 2,05 раза. Типичная форма в этом фенологическом состоянии превосходила обобщённое по всему массиву данных значение: 0,29±0,01 мг/г (контроль) и 0,25±0,01 мг/г (Total). Осенний учёт обнаружил заметный рост концентрации каротиноидов в целом. При этом, максимальный показатель (0,88±0,01 мг/г), отмеченный у сорта 'Danica', превысил соответствующий минимум (0,46±0,01 мг/г), зафиксированный у сорта 'Mirjam' в 1,73 раза, или на

0,42 мг/г. Накопление каротиноидов в хвое типичной формы достигло уровня 0,82±0,05 мг/г, что на 0,16 мг/г, или в 1,24 раза, больше, чем в обобщённой оценке – 0,66±0,01 мг/г.

Выступавшее интегральным показателем насыщенности хвои пигментами их общее суммарное содержание в ней адекватно отражало отмеченные ранее особенности указанных характеристик у представителей разных форм и сортов туи (см. табл. 5).

В отношении важного физиологического показателя общего состояния растений – отношения содержания хлорофилла-*a* к содержанию хлорофилла-*b* – сорта и типичная форма туи западной также неоднородны (см. табл. 6).

Таблица 5. **Общее суммарное содержание пластидных пигментов в клетках хвои туи западной**
Table 5. Total plastid pigments content in the cells of Western thuja needles

Сорт, форма (вариант опыта)	Среднее, мг/г	Максимум, мг/г	Минимум, мг/г	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
Весна (первый срок учёта): 07.05.2019 г.					
'Golden Smaragd'	1,23±0,15	2,07	0,30	48,57	12,54
'Rheingold'	1,08±0,10	1,63	0,22	36,27	9,36
'Danica'	2,83±0,24	4,34	1,38	32,78	8,46
'Golden Globe'	1,67±0,19	2,66	0,44	44,35	11,45
'Sunkist'	0,84±0,09	1,41	0,30	40,52	10,46
'Yellow ribbon'	1,70±0,07	2,24	1,28	15,22	3,93
'Mr. Bowling Ball'	4,20±0,10	4,98	3,48	9,00	2,32
'Mirjam'	2,36±0,08	2,96	1,88	13,49	3,48
'Tiny Tim'	2,83±0,07	3,34	2,40	9,25	2,39
Контроль	2,85±0,04	3,25	2,64	5,85	1,51
Total	2,16±0,09	4,98	0,22	51,13	4,17
Осень (второй срок учёта): 10.10.2019 г.					
'Golden Smaragd'	2,94±0,03	3,13	2,65	4,46	1,15
'Rheingold'	2,78±0,04	2,94	2,44	5,22	1,35
'Danica'	4,57±0,04	4,92	4,32	3,24	0,84
'Golden Globe'	4,15±0,18	4,79	2,98	16,65	4,30
'Sunkist'	2,80±0,04	2,94	2,46	5,07	1,31
'Yellow ribbon'	3,06±0,03	3,31	2,87	4,03	1,04
'Mr. Bowling Ball'	4,50±0,09	4,90	3,92	8,05	2,08
'Mirjam'	2,76±0,07	3,10	2,26	9,17	2,37
'Tiny Tim'	3,36±0,08	3,88	2,99	9,37	2,42
Контроль	4,65±0,10	5,48	4,14	8,15	2,10
Total	3,56±0,07	5,48	2,26	23,39	1,91

Таблица 6. **Отношение содержания хлорофилла-а к содержанию хлорофилла-в в хвое туи западной**
Table 6. Ratio of chlorophyll-*a* content to chlorophyll-*b* content in the needles of Western thuja

Сорт, форма (вариант опыта)	Среднее	Максимум	Минимум	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %
Весна (первый срок учёта): 07.05.2019 г.					
'Golden Smaragd'	2,93±0,10	3,44	1,88	13,73	3,54
'Rheingold'	2,62±0,17	3,22	1,08	25,20	6,51
'Danica'	1,81±0,11	2,39	1,16	22,88	5,91
'Golden Globe'	2,33±0,12	3,22	1,53	19,40	5,01
'Sunkist'	1,85±0,30	3,79	0,61	61,60	15,90
'Yellow ribbon'	1,99±0,06	2,36	1,70	11,23	2,90
'Mr. Bowling Ball'	1,84±0,02	1,96	1,75	3,31	0,85
'Mirjam'	2,75±0,08	3,26	2,40	11,03	2,85
'Tiny Tim'	2,09±0,03	2,32	1,86	6,12	1,58
Контроль	2,40±0,03	2,57	2,27	4,42	1,14
Total	2,26±0,05	3,79	0,61	27,24	2,22
Осень (второй срок учёта): 10.10.2019 г.					
'Golden Smaragd'	10,93±0,81	17,55	7,68	28,65	7,40
'Rheingold'	3,87±0,06	4,30	3,52	5,91	1,53
'Danica'	5,99±0,19	7,60	4,23	12,15	3,14
'Golden Globe'	6,72±0,24	7,92	5,20	13,85	3,58
'Sunkist'	6,82±0,33	8,65	4,95	18,51	4,78
'Yellow ribbon'	4,25±0,14	5,09	3,40	12,57	3,25
'Mr. Bowling Ball'	3,39±0,08	3,81	2,87	9,69	2,50
'Mirjam'	4,06±0,13	5,09	3,39	12,52	3,23
'Tiny Tim'	4,15±0,13	5,30	3,17	12,27	3,17
Контроль	1,04±0,03	1,30	0,85	13,04	3,37
Total	5,12±0,23	17,55	0,85	54,33	4,44

Например, в начальной фазе вегетации удаётся заметить более высокое значение у сорта 'Golden Smaragd' ($2,93 \pm 0,10$), а в конце – у сорта 'Danica' ($1,81 \pm 0,11$). Разница составила 1,11 единицы, а превышение было в 1,62 раза. За счёт превосходства в содержании хлорофилла-*a* типичная форма туи имела более высокий уровень его отношения к содержанию хлорофилла-*b* ($2,40 \pm 0,03$) по сравнению с обобщённым для всего ассортимента средним ($2,26 \pm 0,05$). Осенью ситуация несколько изменилась, и при сохранении в группе сортов растений наивысшей оценки у того же сорта 'Golden Smaragd' ($10,93 \pm 0,81$) минимум переместился к сорту 'Mr. Bowling Ball' ($3,39 \pm 0,08$). Разница в показателях возросла

и достигла 7,02 единицы, а превышение составило 1,21 раза. При этом, соотношение в оценках типичной формы и обобщённого массива практически не изменилось и составило: 1,06 (весной) и 1,10 (осенью).

Поскольку все ранее обозначенные фенотипические различия между представителями сравниваемых между собой форм и сортов проявились на выровненном фоне почвенно-климатических условий мест произрастания, возникли основания для признания наследственного характера вызывающих их причин. Дисперсионный анализ, проведённый по однофакторной схеме, подтвердил это предположение для каждого из принятых в опыте сроков учёта (табл. 7, 8).

Таблица 7. Существенность различий форм и сортов туи западной по пигментному составу хвои весной
Table 7. Significance of differences among Western thuja forms and varieties with regard to needle pigment composition in spring

Показатели содержания и соотношения пигментов	Критерий Фишера $F_{оп}$	Доля влияния фактора ($h^2 \pm m_h^2$)				Критерии различий	
		по Плохинскому		по Снедекору			
		h^2	$\pm m_h^2$	h^2	$\pm m_h^2$	НСР ₀₅	D ₀₅
Хлорофилл- <i>a</i> (<i>a</i>)	73,19	0,8247	0,0113	0,8280	0,0111	0,21	0,35
Хлорофилл- <i>b</i> (<i>b</i>)	61,52	0,7982	0,0130	0,8014	0,0128	0,13	0,21
Сумма хлорофиллов (<i>a+b</i>)	73,92	0,8261	0,0112	0,8294	0,0110	0,33	0,54
Каротиноиды (<i>k</i>)	14,31	0,4792	0,0335	0,4702	0,0341	0,04	0,07
Отношение хлорофиллов (<i>a/b</i>)	10,06	0,3927	0,0390	0,3765	0,0401	0,36	0,59
Отношение (<i>a/k</i>)	100,69	0,8662	0,0086	0,8692	0,0084	0,51	0,85
Отношение (<i>b/k</i>)	36,30	0,7000	0,0193	0,7018	0,0192	0,52	0,85
Доля хлорофилла- <i>a</i>	8,89	0,3637	0,0409	0,3447	0,0421	0,04	0,07
Доля хлорофилла- <i>b</i>	8,89	0,3637	0,0409	0,3447	0,0421	0,04	0,07
Доля каротиноидов	43,81	0,7380	0,0168	0,7405	0,0167	0,02	0,04
Отношение (<i>k/(a+b)</i>)	37,78	0,7084	0,0187	0,7103	0,0186	0,04	0,06
Общая сумма пигментов (<i>a+b+k</i>)	66,94	0,8114	0,0121	0,8147	0,0119	0,36	0,59
Сухое вещество	45,06	0,7434	0,0165	0,7460	0,0163	0,99	1,63

Таблица 8. Существенность различий форм и сортов туи западной по пигментному составу хвои осенью
Table 8. Significance of differences among Western thuja forms and varieties with regard to needle pigment composition in autumn

Показатели содержания и соотношения пигментов	Критерий Фишера $F_{оп}$	Доля влияния фактора ($h^2 \pm m_h^2$)				Критерии различий	
		по Плохинскому		по Снедекору			
		h^2	$\pm m_h^2$	h^2	$\pm m_h^2$	НСР ₀₅	D ₀₅
Хлорофилл- <i>a</i> (<i>a</i>)	78,39	0,8344	0,0106	0,8376	0,0104	0,16	0,26
Хлорофилл- <i>b</i> (<i>b</i>)	454,99	0,9669	0,0021	0,9680	0,0021	0,06	0,10
Сумма хлорофиллов (<i>a+b</i>)	96,77	0,8615	0,0089	0,8646	0,0087	0,19	0,31
Каротиноиды (<i>k</i>)	39,43	0,7171	0,0182	0,7193	0,0180	0,07	0,12
Отношение хлорофиллов (<i>a/b</i>)	77,44	0,8327	0,0108	0,8360	0,0105	0,85	1,39
Отношение (<i>a/k</i>)	14,17	0,4767	0,0336	0,4675	0,0342	0,37	0,60
Отношение (<i>b/k</i>)	48,60	0,7575	0,0156	0,7604	0,0154	0,24	0,40
Доля хлорофилла- <i>a</i>	467,26	0,9678	0,0021	0,9688	0,0020	0,01	0,02
Доля хлорофилла- <i>b</i>	467,26	0,9678	0,0021	0,9688	0,0020	0,01	0,02
Доля каротиноидов	17,81	0,5338	0,0300	0,5285	0,0303	0,01	0,02
Отношение (<i>k/(a+b)</i>)	19,19	0,5523	0,0288	0,5480	0,0291	0,02	0,03
Общая сумма пигментов (<i>a+b+k</i>)	97,77	0,8627	0,0088	0,8658	0,0086	0,23	0,38
Сухое вещество	47,15	0,7519	0,0159	0,7547	0,0158	0,96	1,57

По всем анализируемым признакам величины опытных критериев Фишера ($F_{оп} = 8,89 \dots 100,69$ весной и $F_{оп} = 14,17 \dots 467,26$ осенью) превысили минимально допустимый уровень ($F_{05/01} = 1,94/2,53$) как на 5-процентном, так и на 1-процентном уровне значимости (см. табл. 7, 8). Такой результат первого этапа дисперсионного анализа позволяет продолжить его в части вычисления оценок доли влияния организованного фактора, в нашем случае различий между рассматриваемыми формами и сортами, на формирование общего фона дисперсии. В комплексе, построенном по результатам весеннего учёта (см. табл. 7), влияние указанного фактора принимало значения от $36,37 \pm 4,09$ % (доля хлорофилла-*a*, доля хлорофилла-*b*) до $86,62 \pm 0,86$ % (отношение содержания хлорофилла-*a* к содержанию каротиноидов). Данный показатель принято считать коэффициентом наследуемости в широком смысле.

В осеннем учёте (см. табл. 8) при сопоставимом масштабе разброса значений максимальные и минимальные оценки изменили свою принадлежность на противоположную: минимум – $47,67 \pm 3,36$ % (отношение содержания хлорофилла-*a* к содержанию каротиноидов) и максимум – $96,78 \pm 0,21$ % (доля хлорофилла-*a*, доля хлорофилла-*b*). Оценки остальных сортов сравнительно равномерно распределились между этими пределами. Причиной зафиксированного несходства рассматриваемых величин в весенний и осенний период могли выступать специфика дисперсии значений по каждому из признаков и особенность их сезонной динамики. Остаточная дисперсия, проявление которой, как правило, связывают с ненаправленным влиянием комплекса внешних факторов, на фоне эффектов, вызванных сортовными различиями, чаще не являлась доминирующей, достигая величин $13,38$ – $63,63$ % (весной) и $3,22$ – $52,33$ % (осенью).

В порядке обсуждения материалов можно отметить, что применяемый в работе методический инструментарий [17–19] универсален, достаточно эффективен и используется повсеместно [11–13]. Он позволил установить, что особенности пигментного состава хвои декоративных форм и сортов туи западной при её интродукции в Нижегородскую область в целом соответствуют сведениям о содержании и соотношении пластидных пигментов в листовом аппарате других хвойных [11, 20, 21]. Отмеченный сезонно нестабильный характер их накопления в фотосинтезирующей паренхиме в определённой мере согласуется с известными данными по иным древесным видам [13, 20, 21]. Потенциал интродукции декоративных форм и сортов туи западной на территорию Российской Федерации [1–3] и Нижегородской области в её составе [6] достаточно высок.

Выводы

1. Декоративные формы и сорта туи западной неоднородны в своём составе по содержанию и соотношению пластидных пигментов хвои, что проявляется как в начале, так и в конце вегетационного периода.

2. Различия в пигментном составе хвои в значительной мере обусловлены генотипически, что следует из их проявления на выровненном экологическом фоне и нашло подтверждение в результатах дисперсионного анализа: коэффициент наследуемости в широком смысле по отдельным признакам достигал $86,62 \pm 0,86$ % в начале вегетационного периода и даже $96,78 \pm 0,21$ % – в конце.

3. В условиях интродукции в Нижегородскую область пигментный состав хвои декоративных сортов и типичной формы туи западной имеет сезонно нестабильный характер и подвержен значительным изменениям содержания и соотношения хлорофилла и каротиноидов в начале и в конце вегетационного периода, притом что в осенний период их концентрация повышается.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Острошенко В. Ю., Коляда Н. А.* Интродукция туи западной (*Thuja occidentalis* L.) на юг Дальнего Востока России // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2017. № 5 (195). С. 97–101. EDN: NYTYUY
2. *Рязанова Н. А.* Виды и культивары рода *Thuja* L. в интродукционных пунктах Республики Башкортостан // Аграрная Россия. 2020. № 2. С. 15–20. DOI: 10.30906/1999-5636-2020-2-15-20; EDN: GCYZSG
3. *Демиденко Г. А., Турыгина О. В., Худенко М. А.* Произрастание туи западной (*Thuja occidentalis*) в разных категориях озеленения Красноярска // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. П. Филипова. 2022. № 3 (68). С. 83–90. DOI: 10.34655/bgsha.2022.68.3.012; EDN: URWBMV
4. *Grossnickle S. C., Russell J. H.* Yellow-cedar and western redcedar ecophysiological response to fall, winter and early spring temperature conditions // Annals of Forest Science. 2006. Vol. 63, iss. 1. Pp. 1–8. DOI: 10.1051/forest:2005092
5. A street tree survey for Canadian communities: Protocol and early results / J. H. Pedlar, D. W. McKenney, D. Allen et al. // The Forestry Chronicle. 2013. Vol. 89, iss. 6. Pp. 753–758. DOI: 10.5558/tfc2013-137
6. *Котынова М. Ю., Бессчётнов В. П., Бессчётнова Н. Н.* Укоренение черенков декоративных форм туи западной (*Thuja Occidentalis* L.) в теплицах // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Вологда, 01 декабря 2020 года. Вологда: Вологодский государственный университет, 2020. С. 147–149. EDN: HOJQXF
7. *Воскресенская О. Л., Сарбаева Е. В.* Особенности некоторых декоративных форм туи западной, произрастающих на урбанизированных территориях // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Биология. 2006. № 1 (11). С. 24–27.
8. *Воскресенская О. Л., Сарбаева Е. В.* Эколого-физиологические адаптации туи западной (*Thuja occidentalis* L.) в городских условиях: Монография. Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2006. 129 с. EDN: QKRMVD
9. *Полухатов К. К.* Лесорастительное районирование Горьковской области // Биологические основы повышения продуктивности и охраны лесных, луговых и водных фитоценозов Горьковского Поволжья. Горький: ГГУ, 1974. С. 4–20.
10. *Porra R. J., Thompson W. A., Kriedemann P. E.* Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls *a* and *b* extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy // Biochimica et Biophysica Acta. 1989. Vol. 975, iss. 3. Pp. 384–394. DOI: 10.1016/S0005-2728(89)80347-0
11. *Lidholm J., Gustafsson P.* A functional promoter shift of a chloroplast gene: a transcriptional fusion between a novel psbA gene copy and the trnK (UUU) gene in *Pinus contorta* // The Plant Journal. 1992. Vol. 2, iss. 6. Pp. 875–886. DOI: 10.1046/j.1365-3113x.1992.t01-4-00999.x
12. *Wellburn A. R.* The Spectral Determination of Chlorophylls *a* and *b*, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution // Journal of Plant Physiology. 1994. Vol. 144, iss. 3. Pp. 307–313. DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81192-2
13. *Rosenthal S. I., Camm E. L.* Photosynthetic decline and pigment loss during autumn foliar senescence in western larch (*Larix occidentalis*) // Tree Physiology. 1997. Vol. 17, iss. 12. Pp. 767–775. DOI: 10.1093/treephys/17.12.767
14. *Годнев Т. Н.* Строение хлорофилла и методы его количественного определения. Минск: Издательство Академии наук Белорусской ССР, 1952. 215 с.
15. *Максимов Г. Л.* Методы биохимического анализа растений. Л.: Издательство Ленинградского государственного университета, 1978. 192 с.
16. *Шлык А. А.* О спектрофотометрическом определении хлорофиллов *a* и *b* // Биохимия. 1968. Т. 33, № 2. С. 275–285.
17. *Шлык А. А.* Определение хлорофилла и каротиноидов в экстрактах зелёных листьев // Биохимические методы в физиологии растений / под ред. О. А. Павлиновой. М.: Наука, 1971. С. 154–170.
18. *Lichtenthaler H. K.* Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // Methods in Enzymology. 1987. Vol. 148. Pp. 350–382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1
19. *Lichtenthaler H. K., Wellburn A. R.* Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // Biochemical Society Transactions. 1983. Vol. 11, iss. 5. Pp. 591–592. DOI: 10.1042/bst0110591
20. *Бессчётнова Н. Н.* Содержание основных пигментов в хвое плюсовых деревьев сосны обыкновенной // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2010. № 6. С. 21–25. EDN: NCGCFV
21. *Бессчётнова Н. Н.* Пигментный состав хвои плюсовых деревьев сосны обыкновенной в архивах клонов // Труды факультета лесного хозяйства Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии: сборник научных статей, Нижний Новгород, 20–24 мая 2011 года. Нижний Новгород: Нижегородская ГСХА, 2011. Т. 1. С. 57–67. EDN: KYBBXF
22. *Бессчётнова Н. Н.* Многомерная оценка плюсовых деревьев сосны обыкновенной по пока-

зателям пигментного состава хвои // Вестник Марийского государственного технического универ-

ситета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2013. № 1 (17). С. 5–14. EDN: PУCINR

Статья поступила в редакцию 20.03.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 30.05.2024

Информация об авторах

КОТЫНОВА Марина Юрьевна – аспирант кафедры лесных культур, Нижегородский государственный агротехнологический университет. Область научных интересов – интродукция древесных и кустарниковых пород, их физиология, аспекты семенного и вегетативного размножения. Автор четырёх научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-5809>; SPIN-код: 6058-9364

ХАНЯВИН Александр Игоревич – аспирант кафедры лесных культур, Нижегородский государственный агротехнологический университет. Область научных интересов – интродукция древесных и кустарниковых пород, их физиология, аспекты семенного и вегетативного размножения. Автор пяти научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6700-2997>; SPIN-код: 1662-6196

БЕССЧЁТНОВА Наталья Николаевна – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, декан факультета лесного хозяйства, Нижегородский государственный агротехнологический университет. Область научных интересов – искусственное лесовосстановление, лесная селекция, интродукция древесных и кустарниковых пород. Автор 167 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7140-8797>; SPIN-код: 6214-7263

БЕССЧЁТНОВ Владимир Петрович – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой лесных культур, Нижегородский государственный агротехнологический университет. Область научных интересов – лесная селекция, искусственное лесовосстановление, интродукция древесных и кустарниковых пород. Автор 183 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5024-7464>; SPIN-код: 2031-5241

Вклад авторов:

Котынова М. Ю. – полевые данные, валидация, подготовка статьи.

Ханявин А. И. – полевые данные, проверка данных.

Бессчётнова Н. Н. – концепция, руководство, редактирование.

Бессчётнов В. П. – методика, программное обеспечение, формальный анализ.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 635.92+582.477.2

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.31>

EDN: GJDJNV

Pigment Composition of the Needles of Decorative Forms and Varieties of Western Thuja (*Thuja Occidentalis*) in the Conditions of the Nizhny Novgorod Region

M. Y. Kotynova, A. I. Khanyavin, N. N. Besschetnova, V. P. Besschetnov[✉]

Nizhny Novgorod State Agrotechnological University,
97, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation
lesfak@mail.ru [✉]

Abstract. *Introduction.* The problem of forming the assortment composition of landscape plantings in modern cities is closely related with the urgent need to stabilize the environmental parameters of urbanized territories. The composition of urban plantings includes representatives of foreign flora. These include Western thuja (*Thuja occidentalis* L.), varieties and forms of which are used in protective, reclamation and greenery plantings. *The purpose* of the research is a comparative assessment of several decorative forms and varieties of Western thuja in terms of their needle pigment composition during their introduction to the urban plantations in the Nizhny Novgorod region. *Objects and methods of research.* The objects of the research were nine varieties and one typical form of Western thuja, grown on the same experimental site in the arboretum of Nizhny Novgorod State Agrotechnological University. The principles of the only logical difference, typicality, suitability, expediency, and reliability of an experiment were observed in conducting the research. A total of 30 same-aged plants of vegetative origin were used in the study. Five shoots of the same type, age, and phenological state, without signs of damage by biotic and abiotic factors or deviations from normal development were cut off each of the thirty plants simultaneously. Plastid pigments were detected using an SF-2000 spectrophotometer equipped with the GRASS GIS 7.6.1 / QGIS 3.4 software. *Results.* Varieties and form of Western thuja are heterogeneous in terms of pigment composition of their needle foliage, which was observed both at the beginning and at the end of the growing season. In terms of the chlorophyll-a content during the spring period, the highest concentration was found in the variety 'Mr. Bowling Ball' (2.51 ± 0.06 mg/g) and the lowest was observed in the 'Sunkist' variety (0.39 ± 0.05 mg/g). In autumn, the largest amount of chlorophyll-a (3.16 ± 0.02 mg/g) was recorded in the variety 'Danica', and the smallest (1.81 ± 0.03 mg/g) in the variety 'Rheingold'. The analysis of variance confirmed the hereditary conditionality of the noted differences for each observation period. *Conclusions.* Under the conditions of introduction to the Nizhny Novgorod region, the pigment composition of the needles of the ornamental varieties and typical form of Western thuja is seasonally unstable and subject to significant changes in terms of the content and ratio of chlorophyll and carotenoids at the beginning and at the end of the growing season, though their concentrations increase in autumn.

Keywords: introduction; plastid pigments; chlorophyll; carotenoids; variability; hereditary conditionality

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Kotynova M. Y., Khanyavin A. I., Besschetnova N. N., Besschetnov V. P. Pigment Composition of the Needles of Decorative Forms and Varieties of Western Thuja (*Thuja Occidentalis*) in the Conditions of the Nizhny Novgorod Region. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(2):31–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.31>; EDN: GJDJNV

REFERENCES

1. Ostroshenko V. Yu., Kolyada N. A. Introduction of the White Cedar (*Thuja occidentalis* L.) to the south of the Russian Far East. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2017;(5(195)):97–101. EDN: NYTYUY (In Russ.). DOI: 10.30906/1999-5636-2020-2-15-20; EDN: GCYZSG (In Russ.).
2. Ryazanova N. A. Species and cultivars of the genus *Thuja* L. in introduction points of the Republic of Bashkortostan. *Agrarian Russia.* 2020;(2):15–20. DOI: 10.34655/bgsha.2022.68.3.012; EDN: URWBMV (In Russ.).
3. Demidenko G. A., Turygina O. V., Khudenko M. A. Growth of Western thuja (*Thuja occidentalis*) within different categories of landscaping in Krasnoyarsk. *Vestnik of Buryat State Academy of Agriculture named after V. Filippov.* 2022;(3(68)):83–90. DOI: 10.34655/bgsha.2022.68.3.012; EDN: URWBMV (In Russ.).

4. Grossnickle S. C., Russell J. H. Yellow-cedar and western redcedar ecophysiological response to fall, winter and early spring temperature conditions. *Annals of Forest Science*. 2006;63(1):1–8. DOI 10.1051/forest:2005092
5. Pedlar J. H., McKenney D. W., Allen D. et al. A street tree survey for Canadian communities: protocol and early results. *The Forestry Chronicle*. 2013;89(6):753–758. DOI: 10.5558/tfc2013-137
6. Kotynova M. Yu., Besschetnov V. P., Besschetnova N. N. Rooting cuttings of decorative forms of Western thuja (*Thuja Occidentalis* L.) in greenhouses. *Actual problems of development of the forest complex: materials of the XVIII International Scientific and Technical Conference* (Vologda, December 1, 2020). Khamitova S.M. (ed.). Vologda: Vologda State University; 2020:147–149. EDN: HOJQXF (In Russ.).
7. Voskresenskaya O. L., Sarbayeva E. V. Features of some decorative forms of western thuja growing in urbanized territories. *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Series "Biology"*. 2006;(1(11)):24–27. EDN: QKRMVD (In Russ.).
8. Voskresenskaya O. L., Sarbaeva E. V. Ecological and physiological adaptations of western thuja (*Thuja occidentalis* L.) in urban conditions. Monograph. Yoshkar-Ola: Mari State University; 2006. 129 p. EDN: QKRMVD (In Russ.).
9. Poluyakhtov K. K. Forest-growing zoning of the Gorky region. In: *Biological bases of increasing productivity and protection of forest, meadow and water phytocenoses of the Gorky Volga region*. Gorky: GSU Publ., 1974: 4–20. (In Russ.).
10. Porra R. J., Thomson W. A., Kriedemann P. E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls *a* and *b* extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta*. 1989;975(3):384–394. DOI: 10.1016/S0005-2728(89)80347-0
11. Lidholm J., Gustafsson P. A functional promoter shift of a chloroplast gene: a transcriptional fusion between a novel psbA gene copy and the trnK (UUU) gene in *Pinus contorta*. *The Plant Journal*. 1992;2(6):875–886. DOI: 10.1046/j.1365-3113x.1992.t014-00999.x
12. Wellburn A. R. The Spectral Determination of Chlorophylls *a* and *b*, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *Journal of plant physiology*. 1994;144(3):307–313. DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81192-2
13. Rosenthal S. I., Camm E. L. Photosynthetic decline and pigment loss during autumn foliar senescence in western larch (*Larix occidentalis*). *Tree Physiology*. 1997;17(12):767–775. DOI: 10.1093/treephys/17.12.767
14. Godnev T. N. The structure of chlorophyll and methods for its quantitative determination. Minsk: Publishing House of the Academy of Sciences of the BSSR; 1952. 215 p. (In Russ.).
15. Maximov G. L. Methods of biochemical analysis of plants. Leningrad: Publishing House of Leningrad State University; 1978. 192 p. (In Russ.).
16. Shlyk A. A. On spectrophotometric determination of chlorophylls *a* and *b*. *Biochemistry*. 1968;33(2):275–285. (In Russ.).
17. Shlyk A. A. Determination of chlorophyll and carotenoids in extracts of green leaves. In: *Biochemical methods in plant physiology*. Pavlinova O. A. (ed.). Moscow: Nauka Publ.; 1971:154–170. (In Russ.).
18. Lichtenthaler H. K. Chlorophylls *a* and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*. 1987;148:350–382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1
19. Lichtenthaler H. K., Wellburn A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*. 1983;11(5):591–592. DOI: 10.1042/bst0110591
20. Besschetnova N. N. The content of the main pigments in the conifers of the plus trees of the common pine. *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik*. 2010;(6):21–25. EDN: NCGCFV (In Russ.).
21. Besschetnova N. N. Pigment composition of the needles of the plus trees of Scots pine in the archives of clones. *Proceedings of the Faculty of Forestry of the Nizhny Novgorod State Agricultural Academy: collection of scientific articles*. 2011;1:57–67. EDN: KYBBXF (In Russ.).
22. Besschetnova N. N. Multidimensional assessment of Scots pine plus trees using indicators of needle pigment structure. *Vestnik of the Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature management*. 2013;(1(17)):5–14. EDN: PYCINR (In Russ.).

The article was submitted 20.03.2024; approved after reviewing 13.05.2024;
accepted for publication 30.05.2024

Information about the authors

Marina Y. Kotynova – postgraduate student of the Department of Forest Crops, Nizhny Novgorod State Agrotechnological University. Research interests – introduction of tree and shrub species, their physiology, aspects of seed and vegetative reproduction. Author of four scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-5809>; SPIN: 6058-9364

Alexander I. Khanyavin – postgraduate student of the Department of Forest Crops, Nizhny Novgorod State Agrotechnological University. Research interests – introduction of tree and shrub species, their physiology, aspects of seed and vegetative reproduction. Author of five scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6700-2997>; SPIN: 1662-6196

Natalia N. Besschetnova – Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor, Decan of the Faculty of Forestry, Nizhny Novgorod State Agrotechnological University. Research interests – artificial reforestation, forest breeding, introduction of tree and shrub species. Author of 167 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7140-8797>; SPIN: 6214-7263

Vladimir P. Besschetnov – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Forest Crops, Nizhny Novgorod State Agrotechnological University. Research interests – forest breeding, artificial reforestation, introduction of tree and shrub species. Author of 183 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5024-7464>; SPIN: 2031-5241

Contribution of the authors:

Kotynova M. Yu. – field data, validation, preparation of the article.

Khanyavin A. I. – field data, data verification.

Besschetnova N. N. – conceptualization, scientific guidance, editing.

Besschetnov V. P. – methodology development, software, formal analysis.

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

All authors read and approved the final manuscript.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА FORESTRY TECHNOLOGIES AND MACHINES

Научная статья

УДК 674.8

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.46>

EDN: KDHXPB

Физико-механические свойства древесно-цементных композитов на основе отходов оцилиндровки брёвен

В. Ф. Краснова, В. Г. Краснов [✉], Е. С. Шарапов, И. В. Петухов, П. Н. Анисимов

Поволжский государственный технологический университет,

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

KrasnovVG@volgatech.net [✉]

Аннотация. *Введение.* Получение качественного и экологически чистого строительного материала по низкой себестоимости является основной задачей учёных и строительных организаций. Ключевым звеном снижения затрат является использование более дешёвого сырья. При производстве древесно-цементных композитов основным сырьём для получения наполнителя может быть сухостойная древесина. В сухостойной древесине за счёт естественного высыхания под воздействием внешних факторов происходит распад вредных соединений, но в то же время древесина теряет свои свойства и подвергается поражению гнилью и вредителями. *Цель* исследования состоит в изучении физико-механических свойств древесных композиционных материалов с использованием отходов оцилиндровки брёвен, а также сравнение этих свойств с требованиями стандартов для применения этих материалов в строительстве малоэтажных построек. *Результаты.* Определены физико-механические свойства арболита с применением в качестве наполнителя отходов оцилиндровки брёвен, полученных из сухостойной и здоровой древесины. Результаты испытаний показали, что арболит, изготовленный из отходов оцилиндровки брёвен сухостойной древесины в качестве наполнителя, соответствует требованиям ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия», что доказывает возможность использования сухостойной древесины для изготовления древесно-цементных композитов. *Выводы.* Арболит, изготовленный из отходов оцилиндровки брёвен сухостойной древесины в качестве наполнителя и жидкого натриевого стекла, по физико-механическим свойствам соответствует требованиям ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия». Для повышения прочности арболита необходимо добавлять минерализатор в виде жидкого натриевого стекла или добавлять в смесь наполнитель сухостойной и здоровой древесины в соотношении 1:1.

Ключевые слова: арболит; сухостойная древесина; отходы оцилиндровки брёвен; плотность; прочность на сжатие; влажность

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Краснова В. Ф., Краснов В. Г., Шарапов Е. С., Петухов И. В., Анисимов П. Н. Физико-механические свойства древесно-цементных композитов на основе отходов оцилиндровки брёвен // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 46–55. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.46>; EDN: KDHXPB

Введение

Древесина является незаменимым строительным материалом и обладает уникальными свойствами, такими, как низкая теплопроводность, высокая прочность на сжатие, изгиб, растяжение и морозостойкость. К её недостаткам можно

отнести высокое водопоглощение, низкую биологическую стойкость и горючесть материала, а к достоинствам – способность поддаваться различным видам обработки [1] и воспроизводимостью и увеличению данного ресурса при правильном ведении лесного хозяйства.

© Краснова В. Ф., Краснов В. Г., Шарапов Е. С., Петухов И. В., Анисимов П. Н., 2024

Следующим незаменимым материалом в строительстве является цемент. Данный искусственный материал уникален с точки зрения технологической доступности, эффективности, экологической безопасности, биосовместимости и природной сбалансированности [2].

Соединение положительных свойств природного и искусственного материала в одном композиционном материале позволит снизить недостатки их составляющих компонентов и улучшить их физико-механические свойства. В настоящее время промышленность выпускает достаточно большой ассортимент древесно-цементных композиций (ДЦК). К ним относятся арболит, фибролит, цементно-стружечные плиты (ЦСП), ксилолит, опилкобетон и многие другие композиционные материалы. Такое многообразие связано с интенсивным применением в качестве заполнителя самых разных отходов лесопиления и лесозаготовок и другого растительного сырья природного происхождения, ставит задачу по разработке древесно-цементных строительных материалов [3].

Путём изменения древесно-цементного отношения в композициях, степени уплотнения, вида и формы заполнения можно получить строительные материалы с различными физико-механическими свойствами [4]. Так, например, фибролит является теплозвукоизоляционным материалом со средней плотностью 300–500 кг/м³, арболит – конструкционно-теплоизоляционный материал со средней плотностью 400–850 кг/м³, ЦСП – конструктивный плитный материал, который характеризуется¹ средней плотностью 1100–1400 кг/м³.

Одним из факторов, определяющих прочность арболита, является прочность сцепления различного рода частиц в поверхностном слое, т. е. адгезионная прочность. Физико-механические свойства арболита зависят от ряда факторов технологического характера. Основными из которых являются: 1) оптимальный по проч-

ности состав арболита, при котором достигается наибольшая прочность материала; 2) оптимальные технологические параметры обработки изделий, обеспечивающие полноту протекания химических реакций компонентов арболита. Плотность арболита зависит от плотности вяжущего и заполнителя, пористости и водотвёрдого соотношения [5]. Средняя плотность арболита при использовании в качестве заполнителя рисовой лузги, древесной дроблёнки, сечки камыша и дроблёной рисовой соломы изменяется в пределах 600–900 кг/м³, при этом арболитовые изделия по своим физико-механическим свойствам не уступают его аналогам в других странах на примере дюрисола, велокса и пилинобетона [6]. Рассматриваются варианты производства композиционных материалов с использованием таких наполнителей, как опилки, отсев, кора и скоп. В качестве связующего использовался цемент, а химическими добавками служили сернокислый алюминий и жидкое стекло. Отмечается, что наивысший предел прочности на сжатие (2,72 МПа) проявляется у композита с наполнителем в виде древесных опилок [6]. При производстве арболита предлагается использовать: щепу, полученную из сухих кусковых отходов – 28,5 %, портландцемент – 31,8 %, воду – 39,7 % [7]. По прочности на сжатие по ГОСТ 19222-2019² полученный арболит соответствует марке М5, т. е. относится к теплоизоляционным материалам.

В результате исследования переработки сухостойной и усыхающей древесины ели бисульфитным способом установлено [8], что при усыхании значительно изменяется только содержание экстрактивных веществ. Авторы отмечают, что в усыхающей и сухостойной древесине содержание легкогидролизуемых полисахаридов и экстрактивных веществ ниже, чем в здоровой древесине, что положительно сказывается на получении более прочных материалов и снижении расхода химических добавок, а переработка

¹ Плиты цементно-стружечные. Технические условия: ГОСТ 26816-86. М.: Изд-во стандартов, 1986. 11 с.

² ГОСТ 19222-2019. Арболит и изделия из него. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 34 с.

сухостоя положительно отразится на экологической обстановке в целом [8].

Для снижения негативного влияния сахаров, содержащихся в древесном наполнителе, на набор прочности изделий применяют добавки-минерализаторы, в основном, жидкое натриевое стекло. Суть его действия заключается в образовании плёнки вокруг древесного наполнителя для снижения влияния сахаров на цементное тесто [9].

Снижение содержания сахаров в древесине может быть выполнено в процессе предварительной термомодификации древесного наполнителя путём нагрева ВЧ-плазмой [10]. В ходе исследования было выявлено, что термомодификация древесного наполнителя не только снижает количество сахаров в древесине, но и повышает её адгезионные свойства за счёт расширения и упорядочивания пор в древесине.

При производстве термодревбетона рекомендуют использовать измельчённое древесное сырьё размером 5–40 мм, его сушку и термическую модификацию в паровоздушной среде при температуре от 140 до 240 °С с последующей промывкой полученного материала водой и обработкой в течение не менее 30 минут в 5 % водном растворе поливинилацетатной эмульсии [11].

Влажность сухостойной древесины примерно одинакова по всей длине ствола и составляет 23–25 %, а у здоровой древесины влажность намного выше, и она увеличивается от комля к вершине. Это может положительно сказаться на сокращении времени выдержки древесного сырья для производства арболита при использовании сухостойной древесины [12].

В процессе обработки древесины на технологических линиях по производству оцилиндрованных брёвен образуются значительные, до 40 – 45 % объёма, отходы в виде измельчённой древесины. Этот объём является энергетическим ресурсом и может быть вовлечён для производства топлива [13] или в качестве наполнителя в изготовлении древесно-цементных композитов.

Таким образом, существует достаточно большое разнообразие древесных композиционных материалов, но не суще-

ствует единых стандартов и рецептур по изготовлению арболита.

Цель работы – исследование физико-механических свойств древесно-цементных композитов, изготовленных с использованием сухостойной древесины.

Задачи исследования: 1) определить влияние вида наполнителя на физико-механические свойства арболита; 2) доказать или опровергнуть возможность использования отходов оцилиндровки брёвен из сухостойной древесины для изготовления арболита.

Методика и материалы исследования

При проведении исследования были использованы методы построения гипотез, анализ и синтез, натурные эксперименты, а также статистический метод обработки материала. Технические характеристики арболита определены требованиями ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия».

Для проведения исследования изготавливался теплоизоляционный арболит с классом арболита по прочности на сжатие В0,5. Для определения прочности на сжатие изготовили четыре партии разных вариантов по пять образцов в каждой. В I варианте изготовили арболит с использованием отходов оцилиндровки брёвен из здоровой древесины в качестве наполнителя, в качестве химической добавки использовали стекло натриевого жидкое. Во II варианте изготовили арболит с использованием отходов оцилиндровки брёвен из сухостойной древесины в качестве наполнителя, в качестве химической добавки использовали хлорид кальция. В III варианте – арболит с использованием отходов оцилиндровки брёвен из сухостойной древесины в качестве наполнителя, в качестве химической добавки использовали стекло натриевого жидкое. В IV варианте – арболит с использованием отходов оцилиндровки брёвен из здоровой и сухостойной древесины в качестве наполнителя с соотношением 1:1, в качестве химической добавки использовали стекло натриевого жидкое.

Во всех вариантах в качестве древесного наполнителя использовалась отсортированная щепа без коры следующего фракцион-

ного состава: 20 мм – не более 5 %, 10 мм – не более 35 %, 5 мм – не более 60 %.

Для каждого образца арболита общий вес древесного заполнителя составил 612 г. В смесь также добавлялись химические добавки в виде хлорида кальция и жидкого натриевого стекла, общим весом 27 г для каждого образца. В качестве вяжущих материалов для изготовления арболита применяли портландцемент марки М400, общим весом 950 г для каждого образца. Также было определено оптимальное количество необходимой воды, что составило 1 л для всех вариантов опыта. Для приготовления арболитовой смеси смешивали компоненты в следующей последовательности: измельчённая древесина, химическая добавка, смешанная с водой (0,5 л), портландцемент с водой (0,5 л) и всё хорошо перемешивали.

Далее полученную смесь укладывали в металлические формы-кубы с длиной грани 150 мм. Для более однородного распределения смеси полученный состав укладывали послойно, высотой не более 5 см, с последующим уплотнением путём трамбования. Заполненные формы выдерживали в течение суток, после чего производили распалубку.

Затем образцы выдерживали в течение 28 суток в комнатных условиях при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 50 ± 10 % (рис. 1).



Рис. 1. Образцы арболита
Fig. 1. Samples of arbolite

Определение усилия сжатия, при котором разрушается образец, проводилось на разрывной машине Р-10, а прочность на сжатие – по ГОСТ 10180-2012³.

Для определения влажности арболита от образца отбирается дроблёная проба, масса которой должна быть не более 200 г. Взятые пробы взвешивают. Далее пробы подвергают сушке до постоянной массы, при температуре 105 ± 2 °С. Влажность определялась по формуле:

$$W = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100, \%$$

где m и m_0 – масса пробы до и после высушивания.

Оценку достоверности различий между групповыми средними плотности, предела прочности при сжатии и влажности образцов арболита проводили на основании результатов дисперсионного анализа и теста Тьюки (Tukey HSD) с доверительной вероятностью 95 % в программном комплексе SigmaPlot 14 (Systat Software Inc.).

Результаты исследований

Полученные данные исследования физико-механических свойств арболита, изготовленного по разным вариантам, приведены в табл. 1.

Арболит из смеси здоровой и сухостойной древесины с добавлением жидкого натриевого стекла (вариант 4) обладает более высокими физико-механическими свойствами, в сравнении с остальными образцами (см. табл. 1). Образцы только из сухостойной древесины с применением жидкого натриевого стекла (вариант 3), показали более высокие значения, кроме плотности, по сравнению с образцами из здоровой древесины с применением жидкого натриевого стекла (вариант 1) и образцами из сухостойной древесины с добавлением хлорида кальция (вариант 2). Самые низкие показатели выявлены у образцов арболита, изготовленного из сухостойной древесины с применением хлорида кальция (вариант 2), который по показателям плотности не соответствует ГОСТ 19222-2019, т. к. плотность меньше 500 кг/м^3 .

³ ГОСТ 10180 – 2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ, 2013. 30 с.

Таблица 1. Показатели физико-механических свойств образцов арболита по разным вариантам
 Table 1. Indicators of the physical and mechanical properties of arbolite samples in relation to different experimental variants

№ обр.	Масса, г	Размеры, мм			ρ , кг/м ³	P, Н	F, мм ²	R _{сж} , МПа	W, %
		L	B	H					
Вариант 1 – Арболит из здоровой древесины с применением жидкого натриевого стекла									
1	1865	142	148	150	591,61	24500	21016	1,05	3,5
2	1845	146	140	150	601,76	24400	20440	1,01	3,5
3	1900	143	150	153	578,94	27146	21450	1,14	4,9
4	1750	150	150	152	511,70	20778	22500	0,82	4,3
5	1740	147	151	155	505,74	15900	22197	0,65	4,5
Средн.	1820 ±31,9	145,6 ±1,4	147,8 ±2,0	152,0 ±0,9	557,9 ±20,4	22544 ±1945,0	21520,6 ±377,1	0,93 ±0,1	4,1 ±0,3
Вариант 2 – Арболит из сухостойной древесины с применением хлорида кальция									
1	1455	150	149	150	434,00	15400	22350	0,68	7,33
2	1505	150	149	152	443,01	17600	22350	0,76	7,3
3	1510	152	147	152	444,60	17600	22344	0,76	7,41
4	1665	152	152	155	464,94	22600	23104	0,92	7,57
5	1480	146	154	150	438,83	15200	22484	0,67	7,4
Средн.	1523 ±36,8	150 ±1,1	150,3 ±1,24	151,8 ±0,92	445,0 ±5,3	17680 ±1333,6	22526,4 ±146,8	0,76± 0,04	7,4 ±0,05
Вариант 3 – Арболит из сухостойной древесины с применением жидкого натриевого стекла									
1	1720	142	150	150	538,34	20700	21300	0,97	9,6
2	1800	145	153	150	540,91	24300	22185	1,09	12,21
3	1780	150	150	150	527,41	23700	22500	1,05	10,12
4	1795	148	153	151	524,97	23100	22644	1,02	8,67
5	1830	152	147	150	546,01	22600	22344	1,01	10,92
Средн.	1785 ±18,1	147,4 ±1,78	150,6 ±1,12	150,2 ±0,20	535,5 ±4,03	22880 ±615,14	22194,6 ±236,4	1,03 ±0,02	10,30 ±0,60
Вариант 4 – Арболит из сухостойной и здоровой древесины в соотношении 1:1 с применением жидкого натриевого стекла									
1	1810	147	145	150	566,11	28880	21315	1,35	10,8
2	1800	147	150	150	544,22	23600	22050	1,07	10,78
3	2150	152	149	153	620,46	48400	22648	2,13	10,49
4	1870	149	147	152	561,69	29600	21903	1,35	10,44
5	1750	147	148	150	536,25	24000	21756	1,07	9,87
Средн.	1876 ±71,1	148,4 ±1,0	147,8 ±0,9	151,0 ±0,6	565,7 ±14,7	30896 ±4543,8	21934 ±216,7	1,39 ±0,2	10,48 ±0,2

Примечание: ρ – плотность, кг/м³; P – усилие сжатия при разрушении, Н; F – площадь поперечного сечения, мм²; R_{сж} – прочность на сжатие, МПа; W – влажность, %.

Результаты оценки достоверности различий между групповыми средними по плотности, прочности на сжатие и влажности образцов арболита приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка однородности средних значений физико-механических свойств арболита
Table 2. Assessment of the uniformity of the average values of arbolite physical and mechanical properties

Варианты арболита	ρ , кг/м ³	Rсж, МПа	W, %
№ 1	X	X	X
№ 2	X	X	X
№ 3	X	XX	XX
№ 4	X	X	X

Примечание: ρ – плотность, кг/м³; P – усилие сжатия при разрушении, Н; F – площадь поперечного сечения, мм²; Rсж – прочность на сжатие, МПа; W – влажность, %.

Расположение символов «X» в табл. 2 в одном столбце для различных вариантов исполнения композиций арболита указывает на однородность средних. На основании результатов дисперсионного анализа и теста Тьюки установлено значимое влияние состава композиции арболита на его физико-механические свойства.

По плотности по средним показателям имеет максимальное расхождение вариант 2, где использовалась сухостойная древесина с применением хлорида кальция. По показателю прочности на сжатие выявлено наибольшее отклонение средних в варианте 4. При этом в вариантах 3 и 4 средние показатели Rсж более однородны, по сравнению с другими вариантами. По влажности значимо выше

показатели выявлены в вариантах 3 и 4. По показателю W максимальное отклонение имеет вариант 4.

Для проверки гипотезы о равенстве нескольких средних значений, соответствующих различным группам, которые отличаются составом древесных наполнителей, был использован способ однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). При этом для подтверждения наших суждений были обработаны только варианты 1, 3 и 4, которые отличаются только одним фактором – составом наполнителя. Во всех этих трёх вариантах использовалась одна химическая добавка – жидкое натриевое стекло. Результаты исследования приведены в табл. 3 и 4.

Отсутствие влияния типа наполнителя на плотность арболита (см. табл. 3) демонстрируют результаты однофакторного дисперсионного анализа ($F_{\text{расч.}}(1,13) < F_{\text{таб.}}=3,89$), что доказывает возможность использования сухостойной древесины для его изготовления. Качество наполнителя на плотность арболита влияет лишь на 15,9 %, а остальные 84,1 % объясняются влиянием других факторов.

Однофакторный дисперсионный анализ также показал отсутствие влияния типа наполнителя на прочность арболита на сжатие ($F_{\text{расч.}}(3,86) < F_{\text{таб.}}=3,89$).

Показатели влажности арболита в зависимости от типа наполнителя и химической добавки приведены на рис. 2.

Таблица 3. Результаты ANOVA влияния типа наполнителя на плотность арболита

Table 3. Results of ANOVA of the effect of the filler type on the density of arbolite

Источник вариации	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Средний квадрат	Критерии Фишера		Доля влияния, %
				F-расч.	F-таб.	
Вид древесного наполнителя	2461,09	2	1230,54	1,13	3,89	15,9
Прочие факторы	13025,55	12	1085,46			84,1
Итого	15486,63	14				100

Таблица 4. Результаты ANOVA влияния типа наполнителя на прочность на сжатие арболита

Table 4. Results of ANOVA of the effect of the filler type on the compressive strength of arbolite

Источник вариации	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Средний квадрат	Критерии Фишера		Доля влияния, %
				F _{расч.}	F _{таб.}	
Вид наполнителя	0,590653	2	0,295327	3,86	3,89	39,1
Прочие факторы	0,91892	12	0,076577	-	-	60,9
Итого	1,509573	14		-	-	100

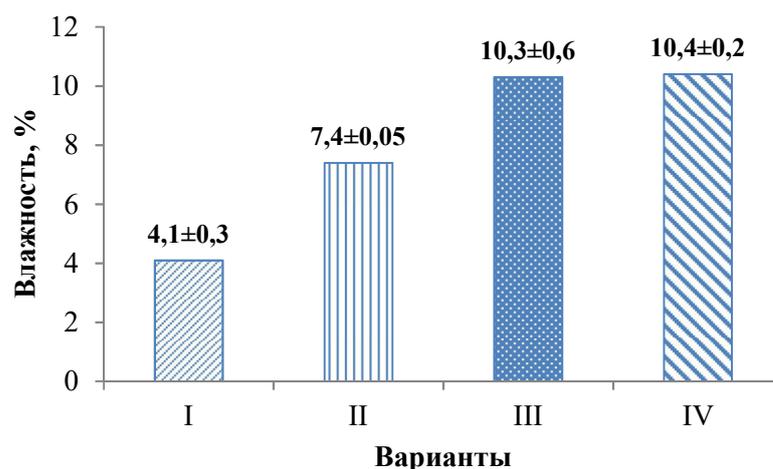


Рис. 2. Диаграмма показателей средней влажности образцов арболита по вариантам, где I – арболит из здоровой древесины с применением жидкого натриевого стекла; II – арболит из сухостойной древесины с применением хлорида кальция; III – арболит из сухостойной древесины с применением жидкого натриевого стекла; IV – арболит из сухостойной и здоровой древесины в соотношении 1:1 с применением жидкого натриевого стекла

Fig. 2. Diagram of the average moisture content of the arbolite samples with regard to different experimental variants: I – arbolite made from sound wood using liquid sodium glass; II – arbolite made from deadwood using calcium chloride; III – arbolite made from deadwood using liquid sodium glass; IV – arbolite made from deadwood and sound wood in a 1:1 ratio, using liquid sodium glass

Для выявления зависимости плотности арболита от других факторов, в том числе и от влажности, нами был применён метод корреляционного анализа по четырём показателям объединённой выборки. Исследования показали, что плотность арболита не зависит от влажности ($r=0,07$), но имеет сильную корреляционную зависимость с показателем усилия сжатия при разрушении ($r=0,75$) и показателя прочности на сжатие ($r=0,75$) (табл. 5).

Таблица 5. Результаты корреляционного анализа
Table 5. Results of the correlation analysis

Показатели	Варианты (см. табл. 1)			
	1	2	3	4
1. Плотность	1	-	-	-
2. Усилие сжатия при разрушении	0,75	1,00	-	-
3. Прочность на сжатие	0,75	0,99	1,00	-
4. Влажность	0,07	0,33	0,43	1,00

Минимальная влажность образцов выявлена у арболита, изготовленного из здоровой древесины с применением жидкого натриевого стекла (4,1 %) – вариант I, а максимальная влажность в III, где арболит был изготовлен из сухостойной древесины с применением жидкого натриевого стекла, и IV варианте, где использованы наполнители сухостойной и здоровой древесины в соотношении 1:1 с применением жидкого натриевого стекла.

Выводы

Арболит, изготовленный из отходов оцилиндровки брёвен сухостойной древесины в качестве наполнителя и жидкого натриевого стекла, по физико-механическим свойствам соответствует требованиям ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия».

Для повышения прочности арболита необходимо добавлять минерализатор в виде жидкого натриевого стекла или добавлять в смесь наполнитель сухостойной и здоровой древесины в соотношении 1:1.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Саркисов Ю. С., Кузнецова Т. В. Синергетика и принципы неравновесного строительного материаловедения // Техника и технология силикатов. 2009. Т. 16, № 4. С. 2–6. EDN: KWTXIR
2. Комбинированные процессы структурообразования древесно-цементных композиций / Ю. С. Саркисов, Н. П. Горленко, Н. В. Субботина и др. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (57). С. 107–115. EDN: WILYNV
3. Наназашвили И. Х. Важнейшая экономическая задача – увеличение объёмов глубокой переработки древесины // Строительные материалы. 2003. № 7. С. 35–36. EDN: IBEJPR
4. Наназашвили И. Х. Арболит – эффективный строительный материал. М.: Стройиздат, 1984. 121 с.
5. Филочкина М. В. Производство опилкобетона в условиях лесного нижнего склада // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. 2010. № 3. С. 27–29. EDN: LDGJRX
6. Удербает С. С. Усовершенствование технологии арболита на основе растительного сырья Республики Казахстан // Вестник НАН РК. 2005. № 4. С. 47–51.
7. Федосенко И. Г. Использование сухих отходов деревообработки в производстве строительных материалов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2014. № 2 (166). С. 128–130. EDN: WKTTQN
8. Громыко С. А., Замалеев В. К., Троянов А. И. Физико-механические свойства древесины лесов, повреждённых стихийными воздействиями // Рук. деп. во ВНИПИЭИлеспроме, 1988. № 2404-лб 88. 19 с.
9. Краснова В. Ф., Зотов Д. А. Применение химических добавок для изготовления арболита // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 38–41. EDN: SNOLYT
10. Экспериментальное исследование физического эффекта обработки древесных отходов ВЧ-плазмой / Е. Ю. Разумов, Р. Р. Сафин, Р. Р. Хасаншин и др. // Деревообрабатывающая промышленность. 2009. № 1. С. 24–25. EDN: TEKENJ
11. Патент № 2790390 С1 Российская Федерация, МПК С04В 18/26, С04В 28/04, С04В 40/00. Способ изготовления термодревбетона: № 2021139396: заявл. 27.12.2021; опубл. 17.02.2023 / В. Ю. Чернов, Ю. В. Чернов, А. С. Разинов и др.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Новые лесные технологии». EDN: ZWUSDG
12. Матюшкина А. П., Агеева М. И. Свойства древесины и целлюлозы из сухостоя сосны // Физико-химические исследования древесины и её комплексное использование: сборник материалов конференции. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, Институт леса, 1978. С. 24–38.
13. Технологические факторы, влияющие на неравномерность технологического процесса производства оцилиндрованных брёвен для деревянного домостроения / И. Р. Шегельман, П. В. Будник, В. Н. Баклагин и др. // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4 (27). Ст. 39. EDN: SBLJGT

Статья поступила в редакцию 13.01.2024; одобрена после рецензирования 04.03.2024; принята к публикации 27.05.2024

Информация об авторах

КРАСНОВА Валентина Феликсовна – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих производств, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – процессы раскрытия низкокачественной древесины на пилопродукцию; прогнозирование выхода пилопродукции из круглых лесоматериалов. Автор 60 научных публикаций, в том числе четырёх учебных пособий и 13 патентов. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4349-2049>; SPIN-код: 9674-2622

КРАСНОВ Виталий Геннадьевич – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – искусственное лесовосстановление, рациональное природопользование. Автор 160 научных публикаций, в том числе шести учебных пособий, монографии и 25 патентов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0742-0393>; SPIN-код: 3179-8907

ШАРАПОВ Евгений Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций и водоснабжения, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – неразрушающий контроль физико-механических свойств древесины и рациональное использование древесных ресурсов леса. Автор 120 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>; SPIN-код: 4400-2367

ПЕТУХОВ Игорь Валерьевич – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и производства ЭВС, ректор, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – интеллектуальный анализ, человеко-машинные системы, автоматическое управление. Автор 163 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>; SPIN-код: 6009-1846

АНИСИМОВ Павел Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Автор 82 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7789-2399>; SPIN-код: 9087-4940

Вклад авторов:

Краснова В. Ф. – методология исследования, проведение эксперимента, анализ полученных результатов, подготовка исходного текста.

Краснов В. Г. – информационный поиск, проведение статистического анализа и редактирование текста.

Шарапов Е. С. – научное руководство, проведение статистического анализа.

Петухов И. В. – научная консультация, окончательное утверждение версии для публикации.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 674.8

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.46>

EDN: KDHXPB

Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composites Based on Log Rounding Waste

V. F. Krasnova, V. G. Krasnov[✉], E. S. Sharapov, I. V. Petukhov, P. N. Anisimov

Volga State University of Technology,

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

KrasnovVG@volgatech.net ✉

Abstract. *Introduction.* Obtaining high-quality, eco-friendly and cost-effective building materials is the main task of researchers and construction organizations. The key element of cost reduction is the use of cheaper raw materials. In the manufacture of wood-cement composites, deadwood can be the basic raw material for producing the filler. The natural drying of deadwood under the influence of external factors leads to the degradation of harmful compounds, but, at the same time, the wood loses its properties and becomes susceptible to rot and pest attacks. *The purpose* of the research is to study the physical and mechanical properties of wood composite materials incorporating log rounding residues, as well as to compare these properties with the requirements specified in the standards for using these materials for constructing low-rise buildings. *Results.* The study revealed the physical and mechanical properties of arbolite filled with the log rounding waste obtained from deadwood and sound wood. The test results showed that arbolite containing deadwood log roundup waste as a filler meets the requirements of the GOST 19222-2019 standard "Arbolite and its products. Specifications". This proves deadwood applicability for manufacturing wood-cement composites. *Conclusions.* In terms of its physical and mechanical properties, arbolite filled with deadwood log rounding waste and liquid sodium glass meets the requirements of GOST 19222-2019 "Arbolite and its products. Specifications". To increase the strength of the arbolite, a mineralizer in the form of liquid sodium glass or a filler made up of deadwood and sound wood in a 1:1 ratio should be added to the mixture.

Keywords: arbolite; deadwood; log rounding waste; density; compressive strength; moisture

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Krasnova V. F., Krasnov V. G., Sharapov E. S., Petukhov I. V., Anisimov P. N. Physical and Mechanical Properties of Wood-Cement Composites Based on Log Rounding Waste. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(2):46–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.46>; EDN: KDHXPB

REFERENCES

1. Sarkisov J.S., Kouznetsova T. V. Synergetic and principles of unbalance building material investigation. *Technique and Technology of Silicates.* 2009;16(4):2–6. EDN: KWTXIR (In Russ.).

2. Sarkisov Yu. S., Gorlenko N. P., Subbotina N. V. et al. Combined processes of structurization of wood-cement compositions. *Journal of Construction and Architecture.* 2016;(4(57)):107–115. EDN: WILYNV (In Russ.).

3. Nanazashvili I. Kh. The most important economic task is to increase the volume of deep wood processing. *Construction Materials*. 2003;(7):35–36. EDN: IBEJPR (In Russ.).

4. Nanazashvili I. H. Arbolite (wood-concrete) is an efficient building material. Moscow: Strojizdat Publ.; 1984. 121 p. (In Russ.).

5. Filichkina M. V. Production of sawdust concrete in a lower timber yard. *Bulletin of Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov*. 2010;(3):27–29. EDN: LDGJRX (In Russ.).

6. Uderbayev S. S. Improving the technology of wood concrete based on plant raw materials of the Republic of Kazakhstan. *Bulletin of NAS RK*. 2005;(4):47–51. (In Russ.).

7. Fedosenko I. G. Use of dry wood waste in the production of building materials. *Proceedings of BSTU. Forest and Woodworking Industry*. 2014;(2):128–130. EDN: WKTTQN (In Russ.).

8. Gromyko S. A., Zamaleev V. K., Troyanov A. I. Physico-mechanical properties of wood from forests damaged by natural influences. Manuscript deposited in VNIPIEIllesprom in 1988, No 2404-lb 88. 19 p. (In Russ.).

9. Krasnova V. F., Zotov D. A. The use of chemical additives for the production of arbolita. *Current Directions of Scientific Research of the XXI century: Theory and Practice*. 2018;6(4):38–41. EDN: SNOLYT (In Russ.).

10. Razumov E. Yu., Safin R. R., Khasanshin R. R. et al. Experimental study of the physical effect of treating wood waste with RF plasma. *Derevoobrabativalnaya promishlennost' (Woodworking Industry)*. 2009;(1):24–25. EDN: TEKENJ (In Russ.).

11. Chernov V. Yu., Chernov Yu. V., Razinov A. S. et al. Method for making thermo-papercrcrete. Patent RF 2790390, 17 February 2023. (In Russ.).

12. Matyushkina A. P., Ageeva M. I. Properties of wood and pulp from pine deadwood. In: *Physico-Chemical Studies of Wood and Its Multipurpose Use: collection of conference materials*. Petrozavodsk: Karelian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1978. Pp. 24–38. (In Russ.).

13. Shegelman I. R., Budnik P. V., Baklagin V. N. et al. Technological factors influencing on technological process of cylindrical logs manufacturing for wood construction. *Engineering Journal of Don*. 2013;(4(27)):39. EDN: SBLJGT (In Russ.).

The article was submitted 13.01.2024; approved after reviewing 04.03.2024; accepted for publication 27.05.2024

Information about the authors

Valentina F. Krasnova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Woodworking Production, Volga State University of Technology. Research interests – processes of cutting low-quality wood into lumber products; forecasting the yield of sawn products from round timber. Author of 60 scientific publications, including four textbooks and 13 patents. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4349-2049>; SPIN: 9674-2622

Vitaly G. Krasnov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Chair of Artificial Crops, Selection and Biotechnology, Volga State University of Technology. Research interests – artificial reforestation, rational environmental management. Author of 160 scientific publications, including six textbooks, a monograph and 25 patents. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0742-0393>; SPIN: 3179-8907

Evgeniy S. Sharapov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chair of Civil Engineering and Water Supply, Volga State University of Technology. Research interests: non-destructive testing of physical and mechanical properties of wood, rational use of forest timber resources. Author of 120 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6500-5377>; SPIN: 4400-2367

Igor V. Petukhov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chair of Design and Production of Computing Systems, Rector, Volga State University of Technology. Research interests – data mining, human-machine systems, automatic control. Author of 163 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2365-4857>; SPIN: 6009-1846

Pavel N. Anisimov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Enterprises Power Supply, Volga State University of Technology. Research interests – forestry and logging technology and machines. Author of 82 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7789-2399>; SPIN: 9087-4940

Contribution of authors:

Krasnova V. F. – research methodology, conducting an experiment, analyzing the results obtained, preparing the source text.

Krasnov V. G. – information retrieval, statistical analysis and text editing.

Sharapov E. S. – scientific guidance, statistical analysis.

Petukhov I. V. – scientific consultation, final approval of the version for publication.

Anisimov P. N. – conducting an experiment, analyzing the results obtained.

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

All authors read and approved the final manuscript.

Краткое сообщение

УДК 630.383

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.56>

EDN: DIWXCD

Оценка напряжённо-деформированного состояния дорожной одежды лесных дорог, усиленной геосинтетическими оболочками

О. Н. Бурмистрова¹, И. Н. Кручинин², В. И. Клевеко³✉

¹ Ухтинский государственный технический университет,
Российская Федерация, 169300, Ухта, ул Первомайская, 13

² Уральский государственный лесотехнический университет,
Российская Федерация, 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

³ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Российская Федерация, 614000, Пермь, Комсомольский пр., 29
vlivkl@mail.ru ✉

Аннотация. *Введение.* Лесные дороги играют важную роль в развитии лесного хозяйства. Они предоставляют доступ к лесным массивам, что позволяет проводить лесозаготовительные работы, вывозить древесину, осуществлять контроль над состоянием лесов и проводить исследования. Поэтому актуальной проблемой лесного комплекса является уменьшение затрат на вывозку древесины. Одним из путей снижения стоимости строительства является применение колеяного типа покрытия. Одним из вариантов устройства такого типа покрытия является использование оболочек из геосинтетического материала. Однако работа таких конструкций изучена недостаточно хорошо. *Цель* исследования – изучение напряжённо-деформированного состояния геосинтетических оболочек в составе дорожной одежды с помощью численного метода. *Объекты и методы.* Объектами исследования являются геосинтетические оболочки, предназначенные для усиления основания дорожной одежды. Для исследования их работы был применён метод конечных элементов. *Результаты.* В статье приведены результаты численного моделирования конструкции дорожной одежды переходного типа с усиливающими геосинтетическими оболочками. Выполненные исследования показали, что применение геосинтетических оболочек позволяет уменьшить вертикальные деформации. При толщине оболочек 0,2 м вертикальные перемещения уменьшаются на 20–48 % в зависимости от ширины оболочки, а при толщине оболочек 0,4 м. – до 59 %. *Выводы.* Предложенные конструкции дорожных одежд с геосинтетическими оболочками позволяют существенно снизить вертикальные деформации дорожной одежды лесных дорог. Эффективность применения геосинтетических оболочек в конструкциях дорожных одежд переходного типа лесных дорог зависит от геометрических параметров оболочек.

Ключевые слова: лесозаготовки; лесное хозяйство; дорожная одежда; вертикальная деформация; метод конечных элементов

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Бурмистрова О. Н., Кручинин И. Н., Клевеко В. И. Оценка напряжённо-деформированного состояния дорожной одежды лесных дорог, усиленной геосинтетическими оболочками // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 56–63. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.56>; EDN: DIWXCD

Введение

Лесная промышленность является одной из важных отраслей экономики многолесных регионов, поскольку лесохозяйственный комплекс имеет для него большое значение. Лесные ресурсы здесь используются для производства древесины, целлюлозы, бумаги, пиломатериалов, а также для добычи древесной биомассы. Эти продукты используются как на мест-

ном уровне, так и для экспорта. Лесная промышленность способствует развитию экономики регионов, созданию рабочих мест и обеспечению местного населения древесными материалами, топливом и другими продуктами лесопереработки. Кроме того, леса играют важную роль в поддержании экологического баланса, сохранении биоразнообразия и оказании благоприятного воздействия на климат.

© Бурмистрова О. Н., Кручинин И. Н., Клевеко В. И., 2024

Также важно учитывать, что лесная промышленность не только создаёт рабочие места, но и участвует в обеспечении местного населения древесными материалами, топливом и другими продуктами лесопереработки, что имеет большое значение для социально-экономического развития, например, Пермского края. Поэтому лесные дороги играют важную роль в развитии лесного хозяйства, обеспечивая доступ к лесным ресурсам, облегчая проведение лесозаготовительных работ и обеспечивая защиту лесов от различных угроз.

Лесные дороги имеют ряд существенных отличий от автомобильных дорог общей сети. Так для лесных дорог, особенно для лесовозных, характерны относительно небольшая интенсивность движения и повышенная нагрузка от колеса автомобиля. В составе транспортного потока лесовозных дорог преобладают специализированные автопоезда, предназначенные для перевозки лесоматериалов. Нагрузки от колёс современных автопоездов могут превышать значения нормативных нагрузок по СП 288. 1325800.2016 «Дороги лесные. Правила проектирования и строительства».

Для уменьшения затрат на вывозку древесины необходимо снижать стоимость строительства и эксплуатации лесных дорог, но при этом нельзя допускать ухудшения их транспортно-эксплуатационных характеристик. Одним из путей снижения стоимости строительства является применение колеяного типа покрытия [1]. Применение такого типа покрытия особенно актуально для временных лесовозных дорог (усы, подъезды), срок службы которых составляет от одного до пяти лет. Одним из способов устройства колеяного типа покрытия является использование оболочек из геосинтетического материала. Это позволяет уменьшить объёмы земляных работ до 40 % и снизить использование кондиционных дорожно-строительных материалов [2].

Изучение возможности применения и особенностей работы геосинтетических оболочек в строительстве рассмотрено в целом ряде исследований, как в зарубежных странах [2–6], так и в нашей стране [7–11]. Однако особенности напряжённо-деформированного состояния таких конструкций изучены ещё недостаточно хорошо.

Цель работы – изучение напряжённо-деформированного состояния геосинтетических оболочек с помощью численного метода, реализованного в программе Paxis 2D.

В задачи входило исследование влияния толщины и ширины геосинтетических оболочек на вертикальную осадку покрытия под колесом расчётного автомобиля и на максимальные растягивающие напряжения в геосинтетических оболочках.

Результаты Объектами исследования являются геосинтетические оболочки, предназначенные для усиления основания дорожной одежды. Для исследования их работы был применён метод конечных элементов.

На рис. 1 представлена конструкция дорожной одежды с геосинтетическими оболочками.

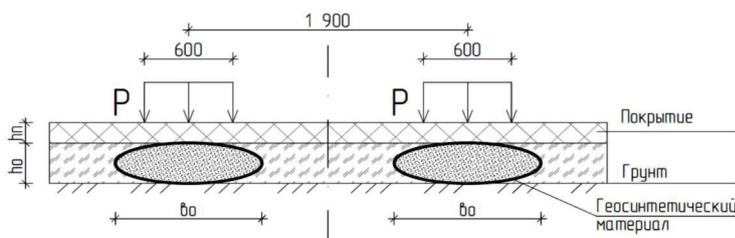


Рис. 1. Конструкция дорожной одежды с геосинтетическими оболочками
Fig. 1. Construction of pavement reinforced with geosynthetic shells

В качестве исходных данных была принята следующая конструкция дорожной одежды:

- покрытие дорожной одежды – щебень фракционированный, толщиной $h_{п} = 0,15$ м с модулем деформации, $E_1 = 450$ МПа;
- засыпка оболочки – песок с модулем упругости, $E_2 = 130$ МПа;
- грунт земляного полотна – суглинок с удельным сцеплением $c = 5$ кПа, углом внутреннего трения $\phi = 5$ град, и модулем упругости, $E_3 = 29$ МПа;
- линейная жёсткость на растяжение геосинтетической оболочки, 500 кН.

Нагрузка от колеса расчётного автомобиля была принята 65 кН.

Были выполнены две серии расчётов для оболочек толщиной 0,2 и 0,4 м. Для выявления зависимости напряжённо-деформированного состояния оболочек от их ши-

рины в каждой серии расчётов были назначены три варианта ширины оболочки – минимальная, максимальная и промежуточная. Минимальная ширина оболочки была принята исходя из расчётной ширины колеса автомобиля с учётом распределяющей способности покрытия. Максимальная ширина оболочки назначена по геометрическим параметрам возможности её размещения по колее расчётного автомобиля.

Результаты расчёта конструкции дорожной одежды представлены в таблице. Для оценки эффективности применения геосинтетических оболочек в конструкциях дорожных одежд были выполнены расчёты аналогичной дорожной одежды без армирования.

В качестве примера на рис. 2–5 представлены результаты расчёта дорожной одежды с геосинтетическими прослойками толщиной 0,2 м и шириной 1,2 м.

Результаты расчёта дорожной одежды

Results of road pavement calculations

Ширина оболочки, м	Высота оболочки, м	Растягивающее усилие в оболочке, кН	Вертикальное перемещение, мм
Без оболочки	0,2	–	6,92
0,8	0,2	1,25	9,76
1,2	0,2	1,27	5,51
1,6	0,2	1,30	3,59
Без оболочки	0,4	–	3,82
1,0	0,4	1,0	7,62
1,2	0,4	0,59	4,63
1,6	0,4	0,55	1,57

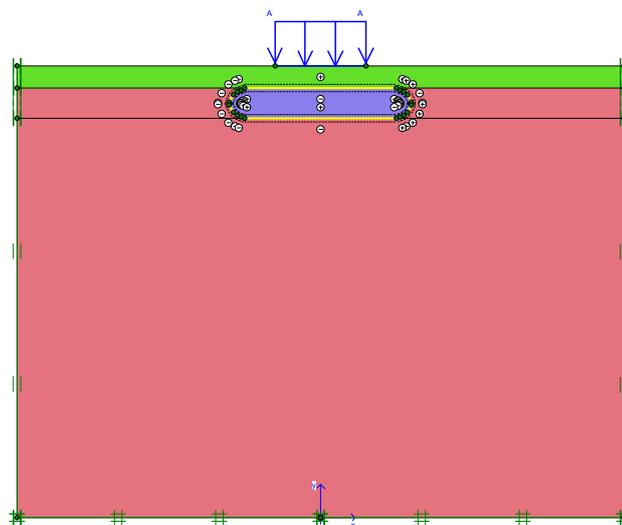


Рис. 2. Расчётная схема для оболочки толщиной 0,2 м и шириной 1,2 м
Fig. 2. Design diagram for a shell with a thickness of 0.2 m and a width of 1.2 m

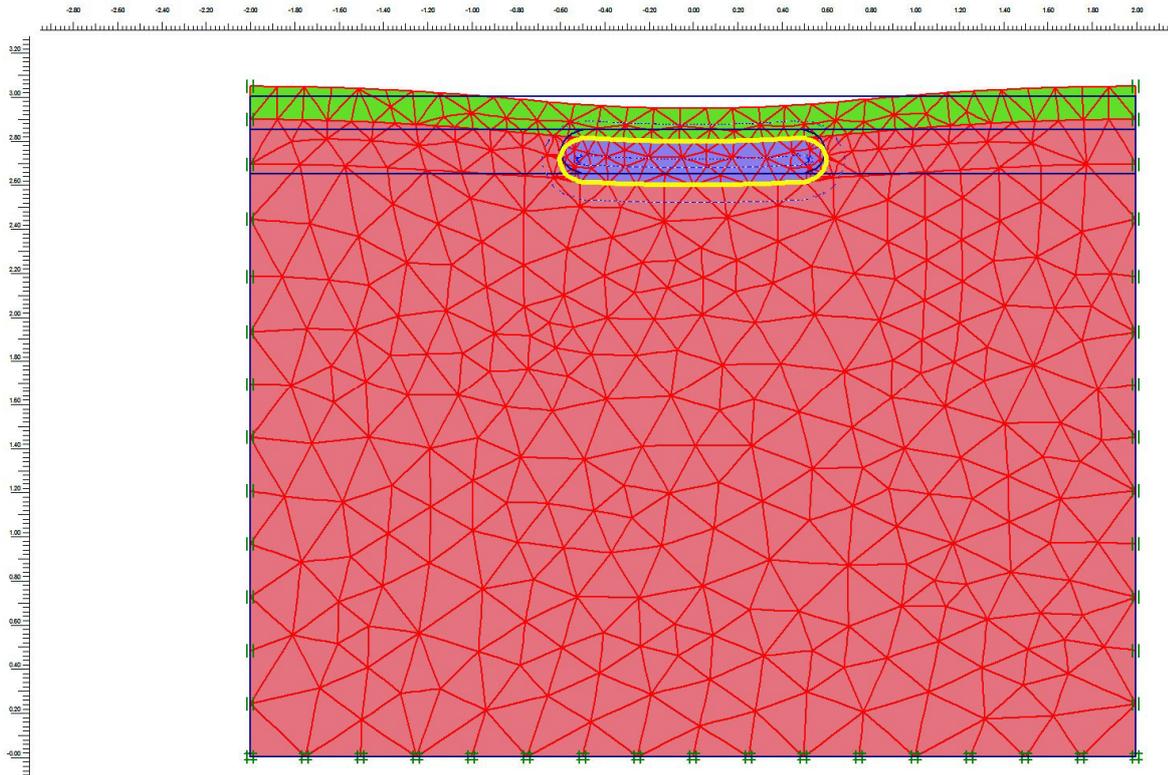


Рис. 3. Деформированная схема для оболочки толщиной 0,2 м и шириной 1,2 м
 Fig. 3. Deformed diagram for a shell with a thickness of 0.2 m and a width of 1.2 m

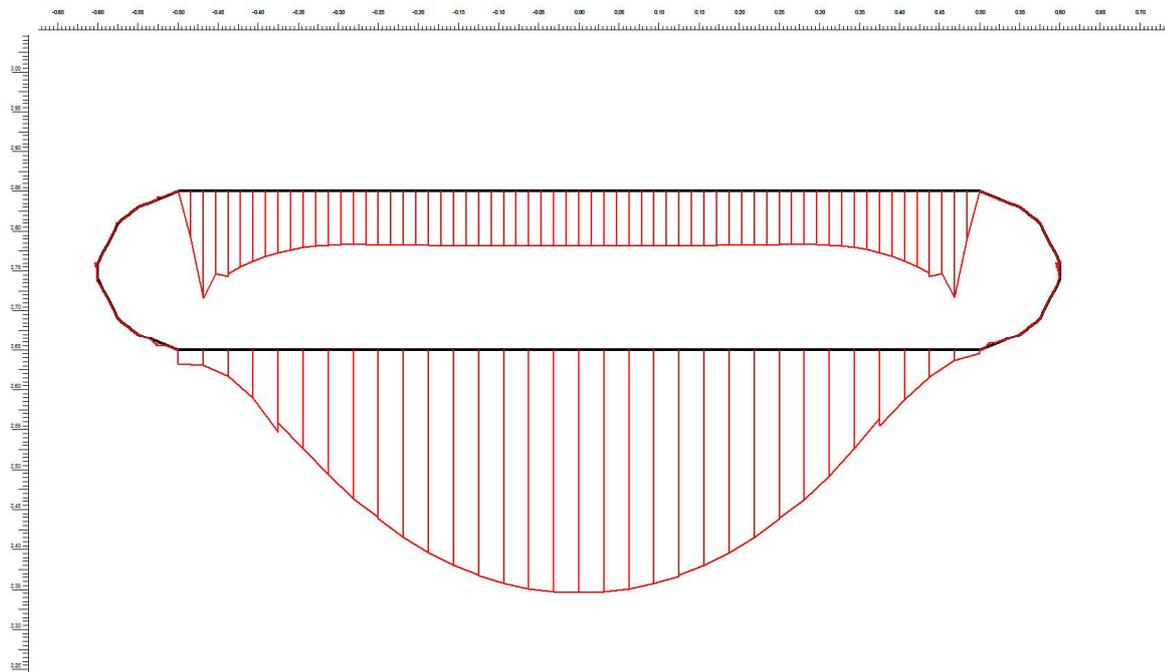


Рис. 4. Эпюра распределения растягивающих напряжений в геосинтетической оболочке толщиной 0,2 м и шириной 1,2 м
 Fig. 4. Diagram of the distribution of tensile stresses in a geosynthetic shell with a thickness of 0.2 m and a width of 1.2 m

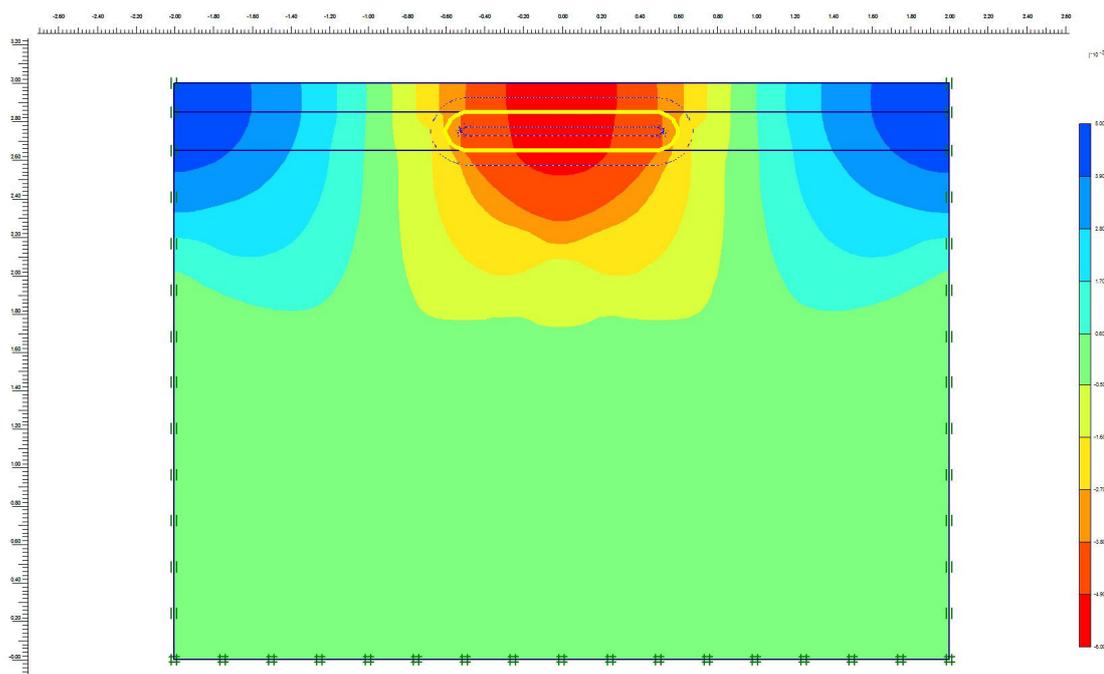


Рис. 5. Распределение вертикальных перемещений для конструкции дорожной одежды с геосинтетической оболочкой толщиной 0,2 м и шириной 1,2 м
 Fig. 5. Vertical displacement distribution for a pavement structure reinforced with a geosynthetic shell with a thickness of 0.2 m and a width of 1.2 m

Выводы

Анализ результатов выполненного численного моделирования работы дорожной одежды с усиливающими элементами в виде геосинтетических оболочек позволяет сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Напряжённо-деформированное состояние геосинтетических оболочек в составе дорожной одежды лесных дорог существенно зависит от геометрических соотношений толщины и ширины оболочки.

2. Для отношений b_0/h_0 менее 4 применение геосинтетических оболочек не эффективно. Значения вертикальных перемещений верха дорожной одежды под колесом расчётного автомобиля для неармированного основания меньше, чем для армированного.

3. Наиболее рационально использование геосинтетических оболочек с соотношением b_0/h_0 от 6 до 8.

4. Проведённые исследования хорошо согласуются с результатами экспериментальных модельных исследований, приведённых в работе [7].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Использование армогрунта в конструкции устоев деревянного моста лесовозной автомобильной дороги / А. М. Бургонутдинов, О. Н. Бурмистрова, В. И. Клевеко и др. // Известия вузов. Лесной журнал. 2023. № 3 (393). С. 113–125. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-113-125; EDN: MIAEZI

2. Усиление лесных дорог геосинтетическими материалами по методу грунт в оболочке / И. И. Тумашик, Н. П. Вырко, А. П. Лашенко и др. // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2007. № 18. С. 60–63. EDN: TZQKQX

3. Xu Y. F., Huang J. Case Study on Earth Reinforcement Using Soilbags // Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering. Geosynthetics Asia 2008: Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, June 17–20, 2008, Shanghai, China. Springer Berlin, Heidelberg, 2009. Pp. 597–602. DOI: 10.1007/978-3-540-69313-0_111

4. A New Structure of Geotextile Called Soil Nets for Reinforcement / B. Xiong, B. Tian., X. Lu et al. // Advances in Materials Science and Engineering. 2017. No 1. Art. 518593. DOI: 10.1155/2017/9518593

5. Matsuoka H., Liu S. New Earth Reinforcement Method by Soilbags ("Donow") // Soils and foundations. 2003. Vol. 43, iss. 6. Pp. 173–188. DOI: 10.3208/sandf.43.6_173
6. Earth reinforcement using soilbags / Y. Xu, J. Huang, Y. Du et al. // Geotextiles and Geomembranes. 2008. Vol. 26, iss. 3. Pp. 279–289. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2007.10.003
7. Семёнов Д. А., Клевеко В. И. Экспериментальные исследования усиления оснований геосинтетическими оболочками различной пространственной конфигурации // Современные технологии в строительстве. Теория и практика: материалы 11-й Всероссийской конференции аспирантов, молодых учёных и студентов, Пермь, 27-29 марта 2019 г. Пермь: ПНИПУ, 2019. Т. 1. С. 39–43. EDN: FUCDZH
8. Семёнов Д. А., Клевеко В. И. Использование геосинтетических оболочек в строительстве // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2018. Т. 9, № 2. С. 78–87. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.2.07; EDN: XRSRCP
9. Пшеничникова Е. С. Геотекстильные конструкции в строительстве земляных сооружений // Гидротехника. 2013. № 3 (32). С. 29–32.
10. Тумашик И. И., Гарабажу А. А., Леонов Е. А. Прочность несвязных грунтов лесных дорог при ограниченных объемных деформациях // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4 (40). С. 121–125. EDN: YSBYVN
11. Алексеенко В. В., Волокитин И. И., Синюшкин А. Д. Повышение сдвигоустойчивости грунтовых технологических карьерных автодорог на слабосвязанных основаниях // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 3 (46). С. 452–460. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-3-452-460; EDN: BVKPLZ

Статья поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 27.03.2024; принята к публикации 15.05.2024

Информация об авторах

БУРМИСТРОВА Ольга Николаевна – доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, метрологии и лесопромышленных технологий, Ухтинский государственный технический университет. Область научных интересов – повышение надёжности и эффективности лесовозных автомобильных дорог. Автор 309 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>; SPIN-код: 1301-0911

КРУЧИНИН Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – разработка и исследования устойчивости функционирования транспортно-производственных систем, повышение структурной прочности дорожных конструкций из малопрочных каменных материалов, совершенствование инструментального контроля при строительстве и содержании автомобильных дорог. Автор 250 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2027-9742>; SPIN-код: 6484-3424

КЛЕВЕКО Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Область научных интересов – исследование напряжённо-деформированного состояния армированных оснований. Автор 192 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>; SPIN-код: 5310-4141

Вклад авторов:

Бурмистрова О. Н. – концепция, постановка цели и задач, подготовка и редактирование статьи.

Кручинин И. Н. – разработка программы, методики.

Клевеко В. И. – программное обеспечение, проверка данных, подготовка и редактирование статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Brief message
UDC 630.383
<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.56>
EDN: DIWXCD

Assessment of the Stress-Strain State of the Forest Road Pavement Reinforced with Geosynthetic Shells

O. N. Burmistrova¹, I. N. Kruchinin², V. I. Kleveko^{3✉}

¹Ukhta State Technical University,
13, Pervomayskaya St., Ukhta, 169300, Russian Federation
²Ural State Forest Engineering University,
37, Siberian Tract, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation
³Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolsky Prospekt, Perm, 614990, Russian Federation
vlivkl@mail.ru✉

Abstract. *Introduction.* Forest roads play an important role in the development of forestry. They provide access to forest expanses, which enables logging operations, timber removal, forest monitoring and research. Reduction of wood removal costs is a pressing issue for the forest sector, which can be tackled, inter alia, by cutting expenditures on the construction and operation of forest roads through the use of tread pavement. One of the options for constructing this type of road pavement is to utilize shells made of geosynthetic materials. However, the functioning of such structures has not been sufficiently investigated. *The purpose* of the research is to study the stress-strain state of the geosynthetic shells as a component of road pavement by applying the numerical method. *Objects and methods.* The objects of the research are geosynthetic shells designed to reinforce the road pavement base. To study their functioning, the finite element method was employed. *Results.* The article presents the results of the numerical modeling of the design of a transition-type road pavement reinforced with geosynthetic shells. The studies undertaken have shown that the use of geosynthetic shells makes it possible to reduce the vertical deformation. With a shell thickness of 0.2 m, vertical movements decrease by 20–48% depending on the width of the shell, and with a shell thickness of 0.4 m - up to 59%. *Conclusion.* The proposed designs of road pavements reinforced with geosynthetic shells allow for a significant reduction in the vertical deformation of the forest road pavement. The efficiency of using geosynthetic shells in transition-type pavement structures of forest roads depends on the geometric parameters of the shells.

Keywords: forest roads; forestry; geosynthetic materials; shells; finite element method

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Burmistrova O. N., Kruchinin I. N., Kleveko V. I. Assessment of the Stress-Strain State of the Forest Road Pavement Reinforced with Geosynthetic Shells. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(2):56–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.56>; EDN: DIWXCD

REFERENCES

1. Burgonutdinov A. M., Burmistrova O. N., Kleveko V. I. et al. Application of reinforced soil foundations in the construction of wooden bridge abutments along logging road. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2023;(3(393)):113–125. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-113-125; EDN: MIAEZI (In Russ.).
2. Tumashik I. I., Vyrko N. P., Lashchenko A. P. et al. Reinforcement of forest roads with geosynthetic materials using the soil-in-shell method. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*. 2007;(18):60–63. EDN: TZQKQX (In Russ.).
3. Xu Y. F., Huang J. Case study on Earth reinforcement using soilbags. In: *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering – Proceedings of the 4th Asian Regional Conference in Geosynthetics*. June 17–20, 2008, Shanghai, China. Berlin, Heidelberg: Springer; 2009:597–602. DOI: 10.1007/978-3-540-69313-0_111
4. Xiong B., Tian B., Lu X. et al. A new structure of geotextile called soil nets for reinforcement. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017;(1):9518593. DOI: 10.1155/2017/9518593

5. Matsuoka H., Liu S. New earth reinforcement method by soilbags ("donow"). *Soils and Foundations*. 2003;43(6):173–188. DOI: 10.3208/sandf.43.6_173
6. Xu Y., Huang J., Du Y. Earth reinforcement using soilbags. *Geotextiles and Geomembranes*. 2008;26(3):279–289. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2007.10.003
7. Semenov D. A., Kleveko V. I. Experimental studies of road bases reinforced with geosynthetic shells of various spatial configurations. In: *Modern technologies in construction. Theory and practice. Proceedings of the 11th All-Russian Conference of Postgraduate students, Young Researchers and Students, 27-29 March 2019. Vol. 1*. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2019:39–43. EDN: FUCDZH (In Russ.).
8. Semenov D. A., Kleveko V. I. Use of geosynthetic shells in construction. *Perm National Research Polytechnic University Construction and Architecture Bulletin*. 2018;9(2):78–87. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.2.07; EDN: XRSRCP (In Russ.).
9. Pshenichnikova E. S. Geotextile carcasses for construction of earthworks. *The Hydrotechnika*. 2013;(3(32)):29–32. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.2.07; EDN: XRSRCP (In Russ.).
10. Tumashik I. I., Garabazhiu A. A., Leonov E. A. Strength of non-advanced grounds of forest roads with limited volume deformations. *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*. 2018;6(4(40)):121–125. EDN: YSBYVN (In Russ.).
11. Alekseenko V. V., Volokitin I. I., Sinyushkin A. D. Improving the shear resistance of ground technological quarry roads on loosely-bound subgrades. *Izvestiia vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2023;13(3(46)):452–460. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-3-452-460; EDN: BBKPLZ (In Russ.).

The article was submitted 12.02.2024; approved after reviewing 27.03.2024; accepted for publication 15.05.2024

Information about the authors

Olga N. Burmistrova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electric Power Engineering, Metrology and Forestry Technologies, Ukhta State Technical University. Research interests – increasing the reliability and efficiency of logging roads. Author of more than 300 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2616-7557>; SPIN: 1301-0911

Igor N. Kruchinin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Highways, Bridges and Tunnels, Ural State Forestry Engineering University. Research interests – research and development of the sustainability of the functioning of transport and production systems; increasing the structural strength of road structures made of low-strength stone materials; improving the instrumental control in highway construction and maintenance. Author of 250 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2027-9742>; SPIN: 6484-3424

Vladimir I. Kleveko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Operations and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University. Research interests – the study of the stress-strain state of reinforced foundations. Author of 192 scientific publications. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>; SPIN: 5310-4141

Contribution of the authors:

Burmistrova O. N. – research concept, setting goals and objectives, preparation and editing of the article.

Kruchinin I. N. – software development, methodology.

Kleveko V. I. – software, data verification, preparation and editing of the article.

Conflict of interests: the authors declare 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*52:630*174.754

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.64>

EDN: BQLZSG

**Assessing the Ecological Health of Hexi Corridor's Forest Ecosystem
Using RSEI Time Series**

Y. Wang¹, E. A. Kurbanov¹✉, J. Sha², O. N. Vorobyov¹, J. Wang³, D. M. Dergunov¹

¹Center for Sustainable Forest Management and Remote Sensing,
Volga State University of Technology,

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

²College of Geography, Fujian Normal University,
8, Shangsang Road, Fuzhou, 350007, China

³Faculty of Geography, Yunnan Normal University,
298, 121 Ave, Kunming, 650500, China

kurbanovea@volgatech.net✉

Abstract. *Introduction.* This study provides an in-depth analysis of the forest Remote Sensing Ecological Index (RSEI) time series data in the Hexi Corridor area from 2000 to 2023, employing non-linear curve fitting to uncover the changing trends and characteristics of the region's forest ecosystems. *Research Aim.* Harnessing the characteristics of nonlinear curves, specific transformative periods and points within the series are identified, facilitating refined predictions for forest ecological trends. By combining the generalized additive model (GAM) to extract the different impact relationships between altitude and RSEI in different forest ecological regions, and the IncMSE analysis of the random forest model, the differences between altitude and forest type on forest ecosystems in different forest ecological regions were found Influence. *Result.* Forests at higher altitudes exhibit greater ecological stability and elevated RSEI values, suggesting improved environmental quality. Natural forests, characterized by their rich biodiversity and complex structures, consistently display the highest RSEI values across various ecological zones, highlighting their pivotal role in maintaining ecological balance and delivering ecosystem services. In contrast, artificial forests, primarily situated at lower altitudes and often near human activities, show linear and stable temporal patterns with lower RSEI values. *Conclusion.* Significant temporal fluctuations of RSEI were identified, particularly in the years 2002, 2010, and 2017, with a noticeable trend of decreasing fluctuation periods over time, likely reflecting the impact of recent forest conservation and restoration efforts. This study uniquely combines curve analysis with ecological indices to provide a comprehensive framework for understanding and predicting changes in forest ecosystems, offering crucial insights for future conservation and management strategies, especially in the Hexi Corridor.

Keywords: Forest ecosystem; RSEI; Generalized Additive Model (GAM); Random Forest; IncMSE Analysis; Temporal Analysis; Hexi Corridor

Acknowledgments: The authors are grateful to the anonymous reviewers for their valuable feedback and guidance in improving the initial version of this manuscript in multiple ways.

Funding: The reported study was funded in the framework of the Russian Science Foundation, grant No. 22-16-00094, <https://rscf.ru/project/22-16-00094/> (accessed on 27 April 2024); CSC (China Scholarship Council) NO. 202110280009.

For citation: Wang Y., Kurbanov E. A., Sha J., Vorobyov O. N., Wang J., Dergunov D. M. Assessing the Ecological Health of Hexi Corridor's Forest Ecosystem Using RSEI Time Series. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(2):64–81. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.64>; EDN: BQLZSG

© Wang Y., Kurbanov E.A., Sha J., Vorobyov O.N., Wang J., Dergunov D.M., 2024

Introduction

Forest ecosystems, as one of the most important biological communities on Earth, play an irreplaceable role in maintaining biodiversity, regulating the climate, and the carbon cycle [1]. With the intensification of global changes, forest ecosystems are facing unprecedented threats, such as forest degradation [2], forest fire disturbances [3], and loss of biodiversity [4], all of which urgently require in-depth research and effective monitoring by the scientific community. The Hexi Corridor is located in northwest China and is a typical ecologically fragile arid and semi-arid region [5]. Due to its special geographical and climatic conditions, it is crucial to the forest ecosystem of the Hexi Corridor. Remote sensing technology, especially the acquisition and analysis of multi-temporal remote sensing data, offers a unique and effective means to monitor forest cover changes on a global and regional scale. By analysing the time series of remote sensing data, tracking, and assessing the long-term trends in forest ecosystems [6], it is crucial for understanding the characteristics of changes in forest ecosystems and formulating forest management strategies.

The advancement of remote sensing technology has facilitated the development and application of various remote sensing ecological indices, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [7], the Enhanced Vegetation Index (EVI) [8], and the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) used in this study [9]. These indices provide powerful tools for assessing the health status and ecological functions of forests and vegetation. They offer a quantitative means to evaluate and understand the dynamic changes in forest ecosystems by integrating the photosynthetic capacity and biomass level of vegetation.

As time series analysis methods become widely applied in ecological research, time series fitting techniques have become crucial for understanding forest and vegetation dynamics. Linear regression methods used

for time series trend analysis can reveal inter-annual changes in forest cover [10], while incorporating seasonal changes through methods like LandTrendr [11] and BFAST [12] can identify short-term disturbances within these trends. Nonlinear fitting methods using polynomial fits [13] offer a more accurate description and analysis of nonlinear changes in vegetation time series data, revealing deeper mechanisms of vegetation changes and the impact of environmental factors [14].

Despite the extensive application of linear and polynomial regression methods in remote sensing time series analysis of forests, these approaches often show limitations when dealing with the complexity of ecological data. Linear models may not adequately capture the complex nonlinear relationships between environmental factors and forest ecosystems [15], and although polynomial models provide some capacity for nonlinear processing, they can be overly simplistic when dealing with high-dimensional interactions [16]. In contrast, Generalized Additive Models (GAM) [17] not only allow each predictor to maintain different nonlinear relationships [18] but also adapt flexibly to data structures through smoothing functions, making them particularly suitable for analyzing complex dynamics in environmental and ecological variables within time series [19]. Furthermore, GAMs can effectively test the impact of each smoothing term to ensure the model is both flexible and avoids overfitting [18]. Meanwhile, the Random Forest model, by constructing multiple decision trees and outputting variable importance scores through Incremental Mean Square Error (IncMSE) analysis [20], provides a powerful tool for identifying and verifying which environmental factors significantly impact forest health [21]. Compared to a single decision tree model, Random Forests enhance prediction accuracy and generalization capabilities due to their ensemble learning nature [22].

The aim of this research was to explore the temporal changes in the forest ecosystems of the Hexi Corridor from 2000 to 2023,

using remote sensing data time series analysis with RSEI as a key indicator of forest ecological health. Curve fitting divides the RSEI time series transformation curve into three linear models and six curve models, and identifies the time points of abrupt changes in the forest ecosystem based on the curve models. Combining elevation and forest type, Generalized Additive Models are used to study the relationship between elevation and different forest ecological regions, while Random Forest models employ Incremental Mean Square Error (IncMSE) analysis to assess the impact of elevation and forest type on forest RSEI across different ecological regions.

Research area

The Hexi Corridor is located in the northwest part of Gansu Province, China, with geographic coordinates ranging from 101°08'E to 103°50'E and 36°45'N to 39°27'N. This region covers an area of approximately 78,000 km² and serves as an important passage connecting the Chinese mainland with its northwest frontier, as well as being one of the core sections of the ancient Silk Road

[23]. Situated at the southern edge of the Qilian Mountain range, the terrain of the Hexi Corridor gradually descends from south to north, creating a unique topography and ecosystem (Fig. 1). Climatically, the Hexi Corridor features a typical temperate continental arid climate, characterized by dryness, scarce precipitation, and abundant sunshine [24]. The annual average temperature is about 7,7 °C, while the annual precipitation varies depending on the location, generally showing a decreasing trend from east to west and from south to north, with annual average precipitation ranging from 50 to 400 millimeters. A significant seasonal precipitation pattern is observed, with about 90 % of the rainfall concentrated between May and October. In terms of forest resources, the forest coverage rate in the Hexi Corridor is relatively low, mainly concentrated in the mountainous areas and oasis regions near rivers. The Qilian Mountains are the main forest distribution area in this region, where the forests are primarily composed of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*), Sea-buckthorn (*Hippophae rhamnoides*), forming a unique alpine forest ecosystem [25].

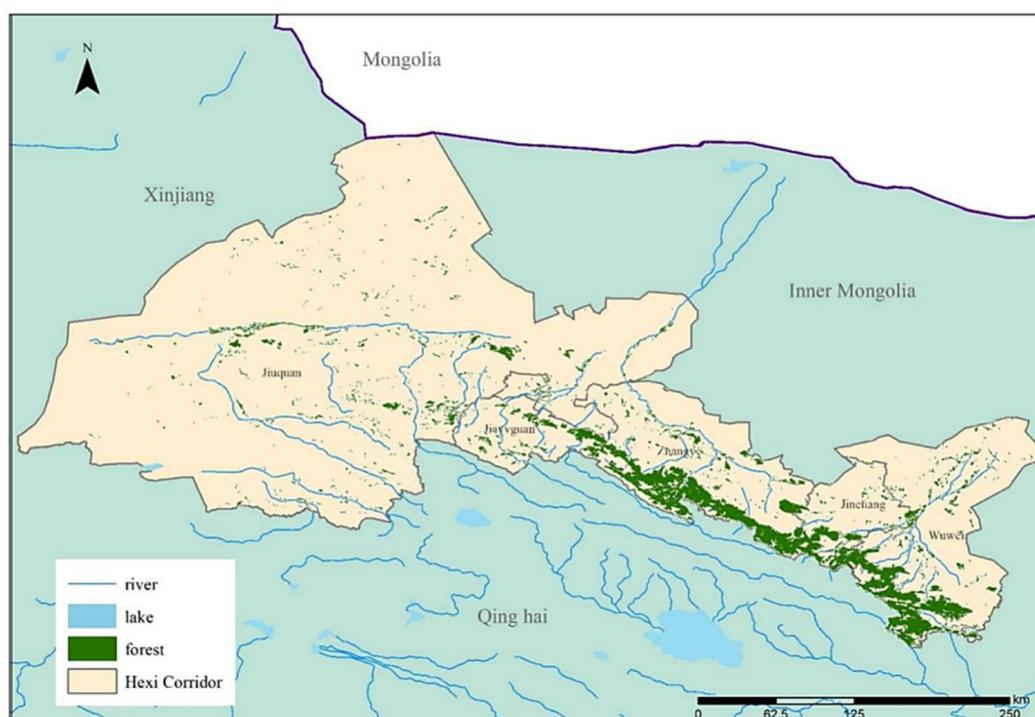


Fig. 1. Location of forest areas in Hexi Corridor
Рис. 1. Расположение лесных массивов в коридоре Хэси

Data and methods

In this study, we examine the changes in forest ecosystems within the Hexi Corridor area by utilizing the RSEI [26] time series from 2000 to 2023. The remote sensing imagery employed in our analysis is sourced from the Google Earth Engine (GEE) platform, which offers Landsat imagery provided by the United States Geological Survey (USGS). The imagery covers Landsat 5 from 2000 to 2011, Landsat 7 for 2012, and Landsat 8 from 2013 to 2023. The choice of the June to October period for image acquisition is based on the alignment with the peak growth of forest vegetation, ensuring the best possible representation of vegetation health. Over 24 years, a total of 5064 images were acquired, averaging 211 images per year.

Prior to analysis, extensive preprocessing of the imagery was performed on the GEE platform [27]. This involved the removal of cloud cover and the masking of water bodies, snow, glaciers, and barren lands to ensure the dataset's continuity and reliability. The RSEI for forested areas was computed annually using the Landsat images, and linear interpolation was applied to fill in any missing values within the RSEI time series on a per-pixel basis. The RSEI calculation [28] incorporates the following components:

$RSEI=f(\text{Greenness, Wetness, Dryness, Heat})$. (1)
 Greenness: Represented by the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI); Wetness: Derived from the moisture component in the tasseled cap transformation; Dryness: Gauged by the Normalised Difference Im-

pervious Surface Index (NDISI), which incorporates both the Index-based Built-up Index (IBI) and the soil index (SI); Heat: Indicated by the land surface temperature (LST).

The analysis posits that external events impacting forests during the study period can trigger rapid ecological shifts, manifested as either improvements or deteriorations, which then stabilize after initial fluctuations, as argued by Falk et al. [29]. This research enhances traditional linear trend analysis by incorporating three additional time-series curve fitting models based on the S-curve archetype: exponential, logarithmic, and logistic. These models characterize states of initial stability followed by change (exponential), change followed by stability (logarithmic), and a return to stability after change (logistic), thereby capturing key ecological transition points with nuance. Fig. 2 presents the comprehensive steps of the research flowchart.

Furthermore, the analysis categorizes the overall direction of RSEI changes – increasing or decreasing – based on the slope of the time series, with a threshold of 0,05 set to define a linearly stable state. This methodology delineates nine distinct time-series fitting models: linear decreasing, linear increasing, linear stable, exponential increasing, exponential decreasing, logarithmic decreasing, logarithmic increasing, logistic decreasing, and logistic increasing (Fig. 3). Through this sophisticated modeling approach, the study meticulously simulates the temporal dynamics of forest ecosystems, providing a refined understanding of ecological trends over the observed period.

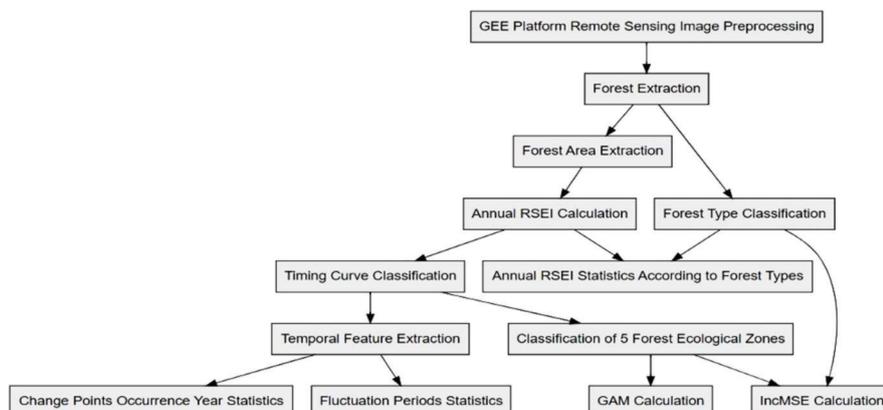


Fig. 2. Experimental flow chart

Рис. 2. Схема эксперимента

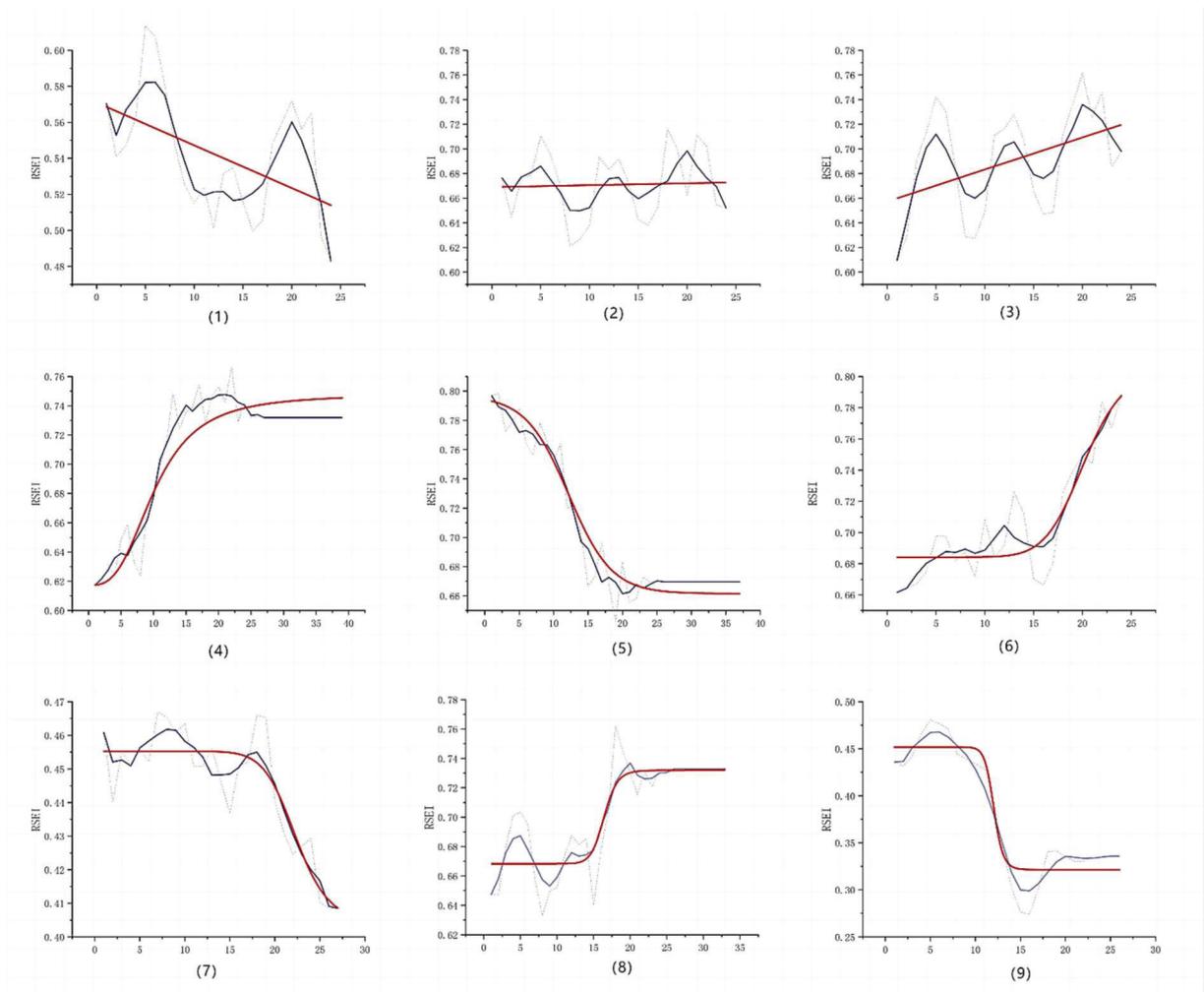


Fig. 3. Timing curves: (1) linear decreasing; (2) linear stable; (3) linear increasing; (4) logarithmic increasing; (5) logarithmic decreasing; (6) exponential increasing; (7) exponential decreasing; (8) logistic increasing; (9) logistic decreasing

Рис. 3. Кривые: (1) линейного снижения; (2) линейной стабильности; (3) линейного роста; (4) логарифмического роста; (5) логарифмического снижения; (6) экспоненциального роста; (7) экспоненциального снижения; (8) логистического роста; (9) логистического снижения

In this study, we utilized two sophisticated approaches, the Generalized Additive Models (GAM) [30] and Random Forest (RF) [31], to investigate the dynamics of the RSEI and its interaction with environmental factors. The application of these two models aims to analyze and predict changes in RSEI from different perspectives and identify key environmental factors driving these changes.

Generalized Additive Models (GAM) are flexible statistical models with considerable degrees of freedom, suitable for studying the nonlinear regression effects of data. They represent a form of non-parametric smoothing regression within the framework

of multivariate regression models. In GAM, it is assumed that the dependent variable Y follows a normal distribution, and the relationship between the independent variables X and the dependent variable Y 's conditional mean can be succinctly expressed as follows [32]:

$$E(Y | X) = \alpha + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_p(X_p) + \varepsilon, \quad (2)$$

here, $E(Y | X)$ denotes the expected value of Y given the set of independent variables X , α is the intercept, and f_1, f_2, \dots, f_p are smooth functions of the independent variables X_1, X_2, \dots, X_p , respectively, and ε is an error term.

Firstly, the introduction of GAM leverages its flexibility as a regression model

to explore the nonlinear relationships between the RSEI and altitude. GAM models the relationship between response variables and explanatory variables through nonlinear smoothing functions, effectively capturing and revealing the complex nonlinear dynamics between variables. Within the framework of this study, to explore and elucidate the complex nonlinear relationships between the Forest RSEI and environmental factors, GAM was chosen as a key analytical tool. Evolving from GLM, GAM introduces nonlinear smoothing functions [33], enabling the model to flexibly capture and reveal the dynamic nonlinear relationships between response and explanatory variables.

In order to further analyze and predict changes in the Forest RSEI and its response to environmental factors, we employed the RF model, particularly utilizing Incremental Mean Squared Error (IncMSE) [34] analysis to evaluate the importance of key environmental factors influencing RSEI changes. IncMSE analysis is a method to assess the importance of feature variables in Random Forest models, based on the core assumption that if a feature significantly contributes to the model's predictive ability, randomly altering the values of that feature in the dataset will significantly increase the model's prediction error [35]. Therefore, IncMSE analysis evaluates the impact of randomly shuffling each environmental factor's values on the model's predictive performance, thereby determining the most influential environmental factors on RSEI.

IncMSE analysis begins by calculating the model's prediction error (Mean Squared Error) on the original data, then performs the following steps for each feature: selects a feature and randomly shuffles its values across all samples in the dataset, keeping the values of other features constant. The model's prediction error is recalculated on this new dataset with the shuffled feature values [36]. The prediction error after shuffling the feature values is compared to the original prediction error, and the error increment, IncMSE, is calculated. A higher IncMSE [20] for a feature indicates a greater contribu-

tion to the model's predictive ability, thus considered more important.

Through the combined use of GAM and RF models, this study comprehensively explores the relationship between RSEI and environmental factors, deepening the understanding of changes in forest ecosystems. We classified linearly stable time series as the RSEI stable zone, logarithmic increasing and logistic increasing as the high RSEI stable zone, logarithmic decreasing and logistic decreasing as the low RSEI stable zone, linearly decreasing as the RSEI decreasing zone, and exponential increasing and linearly increasing as the RSEI increasing zone. We employed the GAM to explore the impact of altitude on annual mean RSEI, aiming to reveal the complex relationship between altitude and RSEI within different ecological zones. By introducing altitude as a key explanatory variable and the annual mean RSEI as the response variable, we constructed models for five ecological zones. The model uses a Gaussian link function to accommodate the continuous nature of RSEI and fully capture its nonlinear relationship with altitude. GAM reveals the nonlinear relationships and key turning points between environmental factors and RSEI, while the RF model and IncMSE analysis pinpoint which environmental factors are most crucial to RSEI changes, providing a scientific basis for forest ecology protection and management. This integrated methodology not only enhances insights into the forest ecosystem's response to environmental changes but also offers practical tools for devising effective conservation strategies and management measures.

Results

In this study, we first extracted forest areas in the Hexi Corridor region and classified them as natural forests, shrublands, mixed forests, and plantations according to their forest types. To assess the ecological health and dynamics of these forests over time, we computed the annual RSEI for each forest area from the year 2000 through to 2023. Each year's PCI value was greater than 80, ensuring the reliability of the annual RSEI values. Our findings, as depicted in Figure 3,

indicate that the average annual RSEI values were initially high, exhibiting relatively stable fluctuations with a discernible upward trend. Notably, the RSEI reached its peak in the year 2019, suggesting a period of enhanced ecological conditions within the forest ecosystems of the Hexi Corridor.

Based on the pre-established time-series assessment model employed in the experiment, the RSEI time series for each pixel was analyzed, resulting in eight distinct temporal patterns: exponential growth, linear decline, linear growth, linear stability, logarithmic decline, logarithmic growth, logistic decline, and logistic growth (see Fig. 4). Contrary to anticipated outcomes, no instances of exponential decrease were identified, suggesting that there are no areas within the study region where the forest RSEI has transitioned from a stable state to a continuous downward trajectory. The observed patterns of growth, in particular, exhibited a more nuanced classification than a simple linear trend, with areas of both growth, and decline showing a variety of complex temporal dynamics.

For different time-series curves under forest types: exponential increasing, linear decreasing, linear increasing, linear stable, logarithmic decreasing, logarithmic increasing, logistic decreasing, and logistic increasing

ing. These further classified into 4 forest types – natural forest, shrubland, mixed forest, and plantation forest. For each category, we compute the area, average RSEI, and mean elevation in Table. Except for planted forests, the majority of forests were in a linearly stable state, with areas of RSEI growth exceeding those of RSEI decline. Combined with Fig. 5 we can see the average annual RSEI values for different curves showed significant differences in altitude, and there were also distinct differences between the average annual RSEI and altitude among different forest types under the same curve.

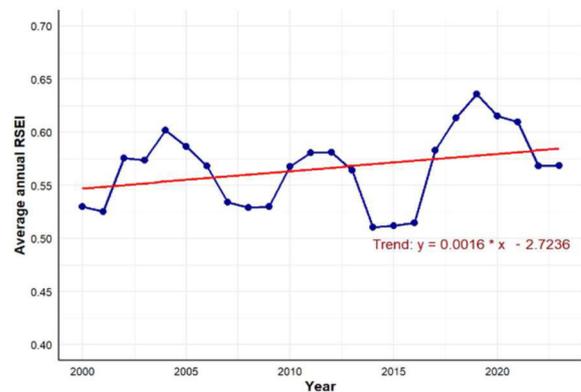


Fig. 4. Average annual RSEI statistics from 2000 to 2023

Рис. 4. Статистика среднегодовых значений индекса RSEI с 2000 по 2023 гг.

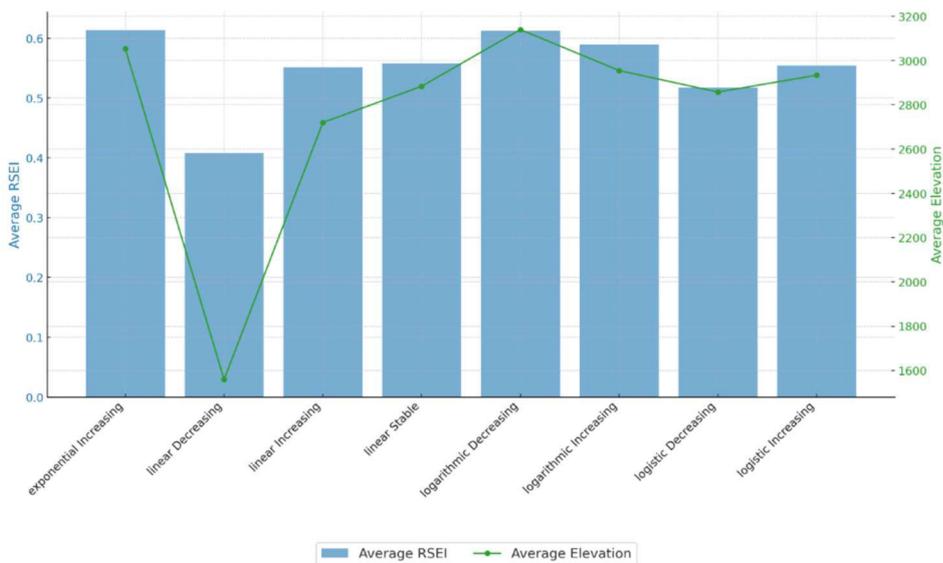


Fig. 5. Average RSEI and average altitude under different curve areas

Рис. 5. Средние значения индекса RSEI и средние значения высоты над уровнем моря под разными участками кривой

Timing curves according to the forest types

Кривые в соответствии с типом леса

Timing Curve	Forest type	Area, km ²	RSEI	Elevation (meter)
Exponential Increasing	Natural Forest	269	0,6399	3039
	Shrubland	571	0,6195	3160
	Mixed Forest	350	0,5898	2940
	Plantation Forest	13	0,4052	1809
Linear Decreasing	Natural Forest	0,21	0,3695	1567
	Shrubland	0,62	0,3653	2709
	Mixed Forest	10	0,4103	1487
	Plantation Forest	0,62	0,4203	1537
Linear Increasing	Natural Forest	13	0,6221	3093
	Shrubland	50	0,5141	2498
	Mixed Forest	44	0,5759	2894
	Plantation Forest	1,24	0,3784	1540
Linear Stable	Natural Forest	1556	0,6187	3005
	Shrubland	3257	0,5523	2983
	Mixed Forest	1570	0,5198	2631
	Plantation Forest	100	0,3882	1721
Logarithmic Decreasing	Natural Forest	6	0,6297	3060
	Shrubland	22	0,6211	3228
	Mixed Forest	16	0,5935	3051
Logarithmic Increasing	Natural Forest	37	0,6221	2963
	Shrubland	31	0,5921	3159
	Mixed Forest	40	0,5551	2788
	Plantation Forest	0,41	0,5393	3040
Logistic Decreasing	Natural Forest	23	0,5863	3036
	Shrubland	30	0,4969	2998
	Mixed Forest	12	0,4448	2253
	Plantation Forest	1	0,4114	1581
Logistic Increasing	Natural Forest	124	0,6267	3115
	Shrubland	146	0,5467	3141
	Mixed Forest	68	0,445	2238
	Plantation Forest	4	0,3865	1468

The relationship between tree species and altitude demonstrated the adaptability of different forest types to geographical locations and environmental conditions. Natural forests and shrublands tend to grow in higher altitude areas, which are usually more pristine and less affected by human activities, while mixed forests have a broader altitude distribution, showing adaptability under dif-

ferent environmental conditions from low to high altitudes. Planted forests are primarily concentrated in lower altitude areas, possibly related to their planting purposes and the need for management convenience. These relationships between tree species and altitude reflect the complex interactions of forest ecosystems under different environmental pressures and the impact of human

activities on forest distribution and forest type selection. Natural forests and shrublands typically display higher environmental quality indicators, while planted forests have lower indicators, maintaining these patterns across different temporal changes. In some cases, mixed forests also show higher RSEI values, especially in linear increasing.

According to Fig. 4, the Exponential increasing category demonstrated the highest average RSEI values at 0,613, with an average forest altitude of 3,054 meters. Other time-series curve types also showed similar trends, indicating a strong correlation between high RSEI values and high altitudes. Forests in high-altitude areas are generally less disturbed by human activities, likely harbouring more pristine and intact ecosystems, which contributes to maintaining high environmental quality.

Forests in the linear decreasing trend area had the lowest average RSEI value of 0,408, with an average altitude of 1,559 meters, which is relatively low. Lower altitude areas are more susceptible to human activities such as agriculture, urban expansion, and industrial activities, which may lead to biodiversity loss

and ecosystem service degradation, thus lowering the quality of the forest ecological environment. Based on the characteristics of the curves, we first extracted the significant change points in forest RSEI time series within the study period for three types of temporal curves: exponential increasing, logarithmic increasing, and logarithmic decreasing (Fig. 6). Density indicates the frequency of RSEI time series change points in that year. We found that the time of significant change points is concentrated between 2015 and 2020, especially the exponential increase is particularly significant. The time points for exponential increasing indicate the years when forest RSEI transitions from stable to rapidly increasing. Logarithmic increasing shows forest RSEI transitioning from rapid increase to stability. Logarithmic decreasing represents forest RSEI shifting from rapid decline to stability. As illustrated in Fig. 6, the frequency of these time points shows three peaks in the years 2002, 2010, and in 2017, with the highest frequency occurring in 2017, especially for exponential increasing, where the quantity of this curve type significantly surpasses the other two.

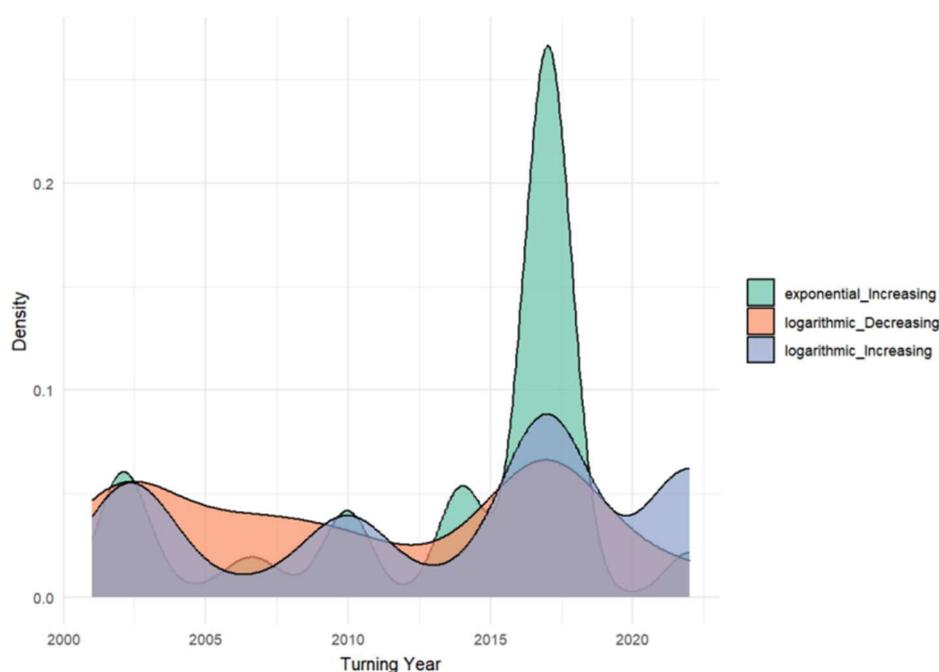


Fig. 6. Density statistics chart of exponential increasing, logarithmic increasing, and logarithmic decreasing change points occurrence years

Рис. 6. График статистики плотности точек изменения при экспоненциальном росте, логарифмическом росте и логарифмическом убывании по годам возникновения

Similarly, the change points for logistic curves, which depict periods of fluctuation from stability back to stability, were extracted. As shown in Fig. 7, fluctuating periods are present throughout the entire study period, but the specific times of fluctuations and their durations vary. The start times are primarily clustered around 2001 and 2014, while the end times concentrate around 2004 and 2018. In 2013, the most common duration of fluctuation was 4 years, with fluctuation periods mainly ranging from 1 to 5 years.

Although all experienced a process from stability to fluctuation and back to stability, the time of fluctuation varies. Based

on the concentration of start and end times at the extremes of the study period and the fact that most changes occurred within five years, we can hypothesise that the fluctuation intervals in the entire study period are mainly concentrated in two phases: 2000–2005 and 2013–2023. The analysis of all change periods (Fig. 8) indicates that the early phase of the study experienced longer durations of fluctuation, while the later phase had shorter durations, with a peak in 2013. This suggests a trend of shortening fluctuation periods over time, indicating that the forest RSEI in these areas can recover to stability more quickly in later periods.

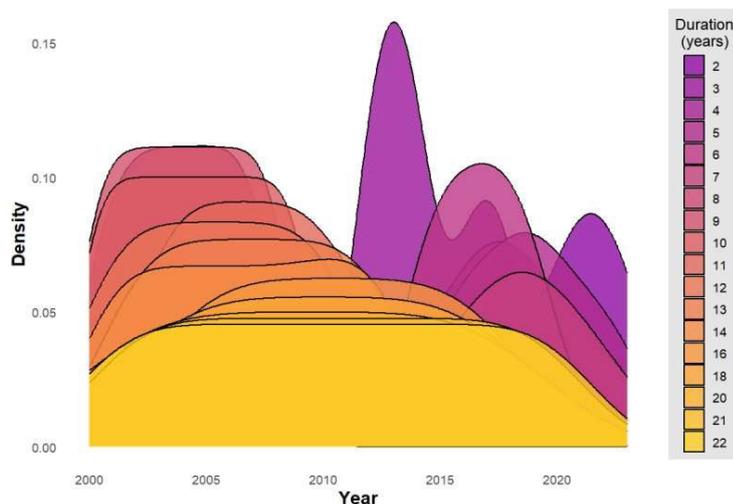


Fig 7. Fluctuation periods of RSEI Logistic curve
 Рис. 7. Периоды колебаний логистической кривой индекса RSEI

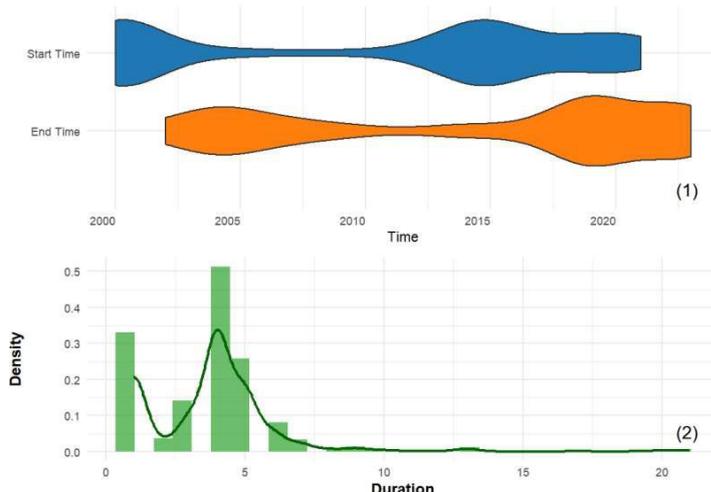


Fig. 8. (1) Logic curve fluctuation start time and end time statistics; (2) Logic curve fluctuation duration statistics
 Рис. 8. (1) Статистика времени начала и окончания периодов колебаний логистической кривой; (2) статистика длительности колебаний логистической кривой

Using the GAM analysis, response curves for RSEI with altitude across different ecological zones were calculated (Fig. 9). The analysis revealed a significant nonlinear relationship between altitude and annual mean RSEI. This indicates that, in the majority of ecological zones, as altitude increases, forest RSEI correspondingly rises, reflecting better ecological quality and environmental stability. Notably, aside from the unique pattern exhibited by the ecological decreasing zone, the other four ecological zones show a tendency for RSEI changes to stabilize when altitude exceeds 3,000 meters, demonstrating adaptability to high-altitude environments.

Further analysis identified a clear turning point at around 2,000 meters in altitude across these four ecological zones, indicating this altitude as a key threshold affecting forest ecological stability. Meanwhile, at altitudes around 4,000 meters, the trend of RSEI im-

provement slows down or even slightly declines in the high RSEI stable zone and low RSEI stable zone compared to the stable zone, suggesting that ecosystem stability might be challenged under extreme high-altitude conditions.

In-depth analysis using the RF model across different ecological zones identified altitude as a universally important predictor, particularly in the RSEI stable and RSEI increasing zones, as evidenced by the Incremental Mean Square Error (IncMSE) values of altitude changes (Fig. 10). Especially in the RSEI stable and RSEI increasing zones, higher IncMSE values underscore the significant role of altitude variations on forest RSEI, indicating that forest ecological quality in these areas may improve with increasing altitude. Concurrently, there was a notable decrease in the IncMSE value of altitude within the RSEI decreasing zone.

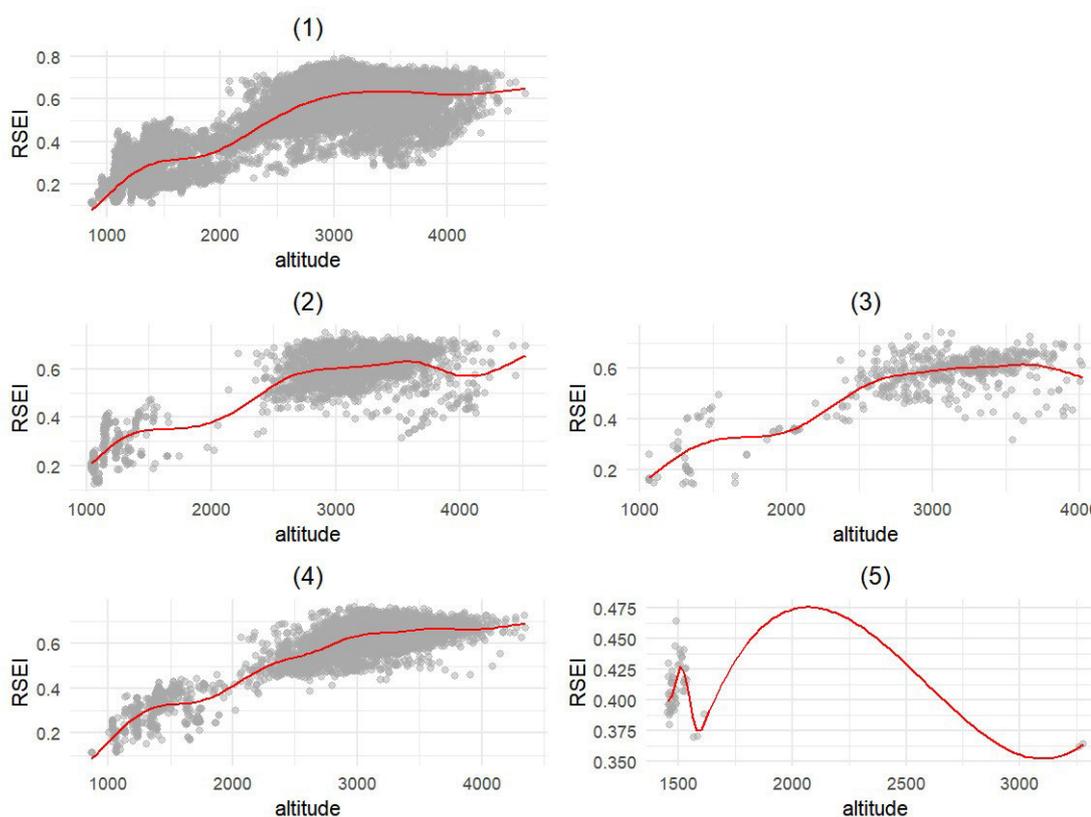


Fig. 9. Altitude's influence curve in different zone: (1) RSEI Stable Zone; (2) High RSEI Stable Zone; (3) Low RSEI Stable Zone; (4) RSEI Decreasing Zone; (5) RSEI Increasing Zone

Рис. 9. Кривая влияния высоты над уровнем моря в разных зонах: (1) зона стабильного индекса RSEI; (2) зона стабильно высокого индекса RSEI; (3) зона стабильно низкого индекса RSEI; (4) зона снижения индекса RSEI; (5) зона роста индекса RSEI

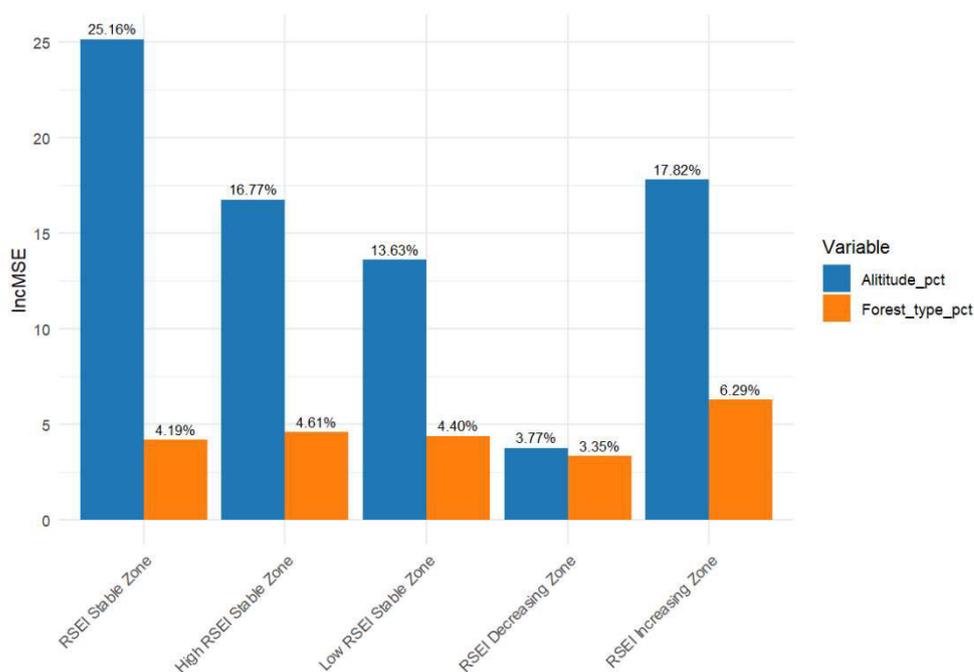


Fig. 10. A comparison of how altitude affects RSEI

Рис. 10. Сравнение влияния высоты над уровнем моря на индекс RSEI

In the RSEI stable zone, the IncMSE value for altitude is the highest, suggesting a close connection between the terrain features and climatic conditions of these areas and altitude changes. The environmental gradient caused by altitude changes may be a significant factor affecting forest ecosystems. In both the high RSEI stable zone and the low RSEI stable zone, the impact of forest types is similar, but altitude has a more substantial influence on the high RSEI stability zone. The characteristic of the RSEI decreasing zone is that IncMSE values of all the factors are relatively low, indicating that ecological degradation might not be solely caused by altitude or forest types but could result from the combined effects of multiple complex factors such as human activities, climate, and fires. In the RSEI increasing zone, both altitude and forest types have relatively high IncMSE values, suggesting that these natural factors play a positive role in improving or restoring forest ecology, potentially related to ecological restoration measures or natural regeneration processes.

Discussion

Compared to traditional linear trend studies of time series, research employing curve trends allows for a more detailed and comprehensive analysis of temporal change patterns [37]. These studies not only identify the trends of change but also extract specific points and periods of transformation within the time series through the characteristics of the curves, thereby facilitating more convenient predictions for the forest ecosystem. By utilizing various curve types, the temporal changes of RSEI can be more accurately modeled, allowing for the identification of specific change points and periods. In the Hexi Corridor region, some studies have already utilized time-series RSEI analysis for small-scale areas [13, 14]. Building on this foundation, our study further supplements the analysis of RSEI changes under different forest types. By employing the GAM and the Increment of IncMSE methods, we not only validate existing research conclusions but also explore the complex nonlinear relationships and variable importance between RSEI, forest types, and altitude in this region.

Natural forests typically have high biodiversity and complex ecosystem structures, contributing to ecological balance and offering a wealth of ecosystem services [38]. These factors may lead to higher RSEI values in natural forest areas, primarily located at higher altitudes with minimal human impact, reflecting better environmental quality and ecological stability. The self-recovery ability and adaptability of natural forests to environmental changes also help maintain their RSEI values. Shrublands usually play a supportive and transitional role within ecosystems, providing habitats and protecting the ground surface, thereby reducing erosion [39]. The RSEI values of shrublands vary by location, showing significant differences at different altitudes, generally ranking just below natural forests. This depends on their role in specific ecosystems and surrounding environmental conditions. Mixed forests are distributed at altitudes lower than natural forests and shrublands but higher than artificial forests. The complex structure of mixed forests offers a variety of ecological niches, encompassing all types of temporal changes. Their RSEI values are lower than those of natural forests and shrublands but higher than those of artificial forests. Artificial forests typically exhibit a linearly stable temporal pattern, often lacking the diversity and complexity of natural forests [40], with relatively lower RSEI values. Located at lower altitudes, often near human activity areas, artificial forests maintain a low stable RSEI under human intervention.

The differences in the distribution of various forest types may reflect the different species' response capabilities to environmental changes and their distribution characteristics under various geographical and ecological conditions [41]. The widespread distribution of natural forests and shrublands demonstrates their strong adaptability to environmental changes, while the characteristics of artificial forests conform to their limitations under artificially intervening environmental conditions. Mixed forests combine the features of both natural forests, shrublands, and artificial forests.

There is a certain correlation between high RSEI values and high altitudes, aligning with the analysis conclusions of the Generalized Additive Model for five regions. This indicates that as altitude increases, its impact on RSEI also grows. High-altitude forests, being less disturbed by human activities, may have higher environmental quality. Conversely, lower RSEI values often occur in lower-altitude areas, likely due to more frequent human activities such as agriculture, urban expansion, and industrial activities [42]. Therefore, altitude may be an important factor affecting forest environmental quality, with high-altitude forests possibly having higher RSEI values due to their relative isolation and ecosystem integrity. These findings highlight the characteristics of forests in the Hexi Corridor region, emphasizing the importance of protecting high-altitude forests for maintaining biodiversity and ecosystem services, while also pointing out the challenges of forest protection and management in low-altitude areas.

The study identified fluctuations in the region's forests in 2002, 2010, and particularly in 2017. Periods of rapid ecological fluctuation occurred between 2000–2005 and 2013–2023. Furthermore, a trend of shortened fluctuation periods over time was observed, likely related to forest protection and restoration projects implemented in recent years. These measures have promoted the stability and recovery of the forest ecosystem. Future research could further analyze the causes of ecological changes in forests based on these specific time points.

The extraction results from the logistic function's band intervals indicate a trend of gradually shorter durations of fluctuation over the years, indicating that the forest ecosystem in the region might be developing in a better direction, able to return to a stable state more quickly. This could be attributed to forest engineering projects implemented since 2000 in the high-altitude areas of the Qilian Mountains, such as the "Three-North Shelterbelt Project (Phases IV and V)" and the "Natural Forest Protection Project," among others. The focused periods of fluctua-

tion in 2000–2005 and 2013–2023 suggest further investigation into the causes of fluctuation during these periods, aiming at more targeted protection of the forest ecosystem in the region.

Conclusions

This study analyzes the RSEI time-series data of forest areas in the Hexi Corridor region from 2000 to 2023, employing various curve-fitting techniques to more accurately analyze the changing trends of the forest ecosystem. Compared to traditional linear trend studies, the application of curve trends allows for a more detailed and comprehensive examination of the changes within the time series. Not only do they reveal the trends of change, but they also extract specific points and periods of transformation through the characteristics of the curves, facilitating more convenient predictions for the forest ecosystem.

The study reveals that different temporal fitting curves delineate five characteristic regions and analyze the impact of altitude and forest type on forest RSEI within these regions. A significant correlation between forest RSEI values, altitude, and forest type has been found, with RSEI values of different forest types exhibiting unique temporal characteristics and changing trends. The for-

est ecosystem in the Hexi Corridor region remains stable overall, with altitude being an important environmental factor significantly affecting forest RSEI values. Forests in high-altitude areas typically exhibit higher RSEI values and better ecological stability due to less human disturbance. Natural forests possess higher RSEI values and stability compared to other forest types.

These findings are significant for guiding forest conservation and management strategies in the Hexi Corridor and broader regions, especially in terms of protecting high-altitude forests and restoring forests in low-altitude areas. By utilizing the unique mathematical properties of curves, changes and periods undetectable by traditional linear trends are identified, thus providing a more complete analysis of the changes in the forest ecosystem.

Future research could further analyze the causes of ecological changes at these specific time points to better guide practical protection and management measures. Continued exploration of the effectiveness of forest conservation and restoration projects, and assessment of the response and adaptation strategies of different forest types to environmental changes, will better inform practical conservation and management actions.

REFERENCES / СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mori A., Lertzman K., Gustafsson L. Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*. 2017;54(1):12–27. DOI: 10.1111/1365-2664.12669
2. Mitchell A., Rosenqvist A., Mora B. Current remote sensing approaches to monitoring forest degradation in support of countries measurement, reporting and verification (MRV) systems for REDD+. *Carbon Balance and Management*. 2017;12(1):9. DOI: 10.1186/s13021-017-0078-9
3. Kurbanov E., Vorobev O., Lezhnin S., et al. Remote sensing of forest burnt area, burn severity, and post-fire recovery: A review. *Remote Sensing*. 2022;14(19):4714. DOI: 10.3390/rs14194714
4. Brockerhoff E. G., Barbaro L., Castagneyrol B., et al. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*. 2017;26(13):3005–3035. DOI: 10.1007/s10531-017-1453-2
5. Wei W., Liu C., Liu Ch., et al. Spatio-temporal analysis of ecological vulnerability in arid region: A case study of Hexi corridor, northwest China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2022;28(5–6):564–593. DOI: 10.1080/10807039.2022.2081834
6. Park T., Ganguly S., Tommervik H., et al. Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data. *Environmental Research Letters*. 2016;11(8):084001. DOI: 10.1088/1748-9326/11/8/084001
7. Zhu X., Liu D. Improving forest above-ground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015;102:222–231. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.08.014
8. Setiawan Y., Yoshino K., Prasetyo L. Characterizing the dynamics change of vegetation cover on tropical forestlands using 250 m multi-temporal MODIS EVI. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014;26:132–144. DOI: 10.1016/j.jag.2013.06.008
9. Zheng Z., Wu Z., Chen Y., et al. Instability of remote sensing based ecological index (RSEI)

and its improvement for time series analysis. *Science of the Total Environment*. 2022;814:15259. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152595

10. Forkel M., Carvalhais N., Verbesselt J., et al. Trend change detection in NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology. *Remote Sensing*. 2013;5(5):2113–2144. DOI: 10.3390/rs5052113

11. Cohen W., Yang Z., Healey S., et al. A LandTrendr multispectral ensemble for forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*. 2018;205:131–140. DOI: 10.1016/j.rse.2017.11.015

12. Wu L., Li Z., Liu X., et al. Multi-type forest change detection using BFAST and monthly Landsat time series for monitoring spatiotemporal dynamics of forests in subtropical wetland. *Remote Sensing*. 2020;12(2):341. DOI: 10.3390/rs12020341

13. Wang J., Xie Y., Wang X., et al. Detecting Patterns of Vegetation Gradual Changes (2001–2017) in Shiyang River Basin, Based on a Novel Framework. *Remote Sensing*. 2019;11(21):2475. DOI: 10.3390/rs11212475

14. Wang Y., Kurbanov E., Vorobiev O. Time series analyses of forest cover change according to elevation gradient in Gansu province of China. *Current problems in remote sensing of the earth from space*. 2022;19(5):176–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-176-189 (In Rus).

15. Sileshi G. W. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management*. 2014;329:237–254. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.06.026

16. Lambert J., Drenou C., Denux J. P., et al. Monitoring forest decline through remote sensing time series analysis. *GIScience & Remote Sensing*. 2013;50(4):437–457. DOI: 10.1080/15481603.2013.820070

17. Naik P., Dalponte M., Bruzzone L. Prediction of forest aboveground biomass using multitemporal multispectral remote sensing data. *Remote Sensing*. 2021;13(7):1282. DOI: 10.3390/rs13071282

18. Wellington M. J., Lawes R., Kuhnert P. A framework for modelling spatio-temporal trends in crop production using generalised additive models. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023;212:108111. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108111

19. Wernicke J., Körner M., Möller R., et al. The potential of generalized additive modelling for the prediction of radial growth of Norway spruce from Central Germany. *Dendrochronologia*. 2020;63:125743. DOI: 10.1016/j.dendro.2020.125743

20. Mallinis G., Chrysafis I., Korakis G., et al. A random forest modelling procedure for a multi-sensor assessment of tree species diversity. *Remote Sensing*. 2020;12(7):1210. DOI: 10.3390/rs12071210

21. Chen S., Yao S. Evaluation of forestry ecological efficiency: A spatiotemporal empirical study based on China's Provinces. *Forests*. 2021;12(2):142. DOI: 10.3390/f12020142

22. Main-Knorn M., Moisen G. G., Healey S. P., et al. Evaluating the remote sensing and inventory-based estimation of biomass in the Western Carpathi-

ans. *Remote Sensing*. 2011;3(7):1427–1446. DOI: 10.3390/rs3071427

23. Yang L., Shi Z., Zhang S., Lee H. Climate change, geopolitics, and human settlements in the Hexi Corridor over the last 5,000 years. *Acta Geologica Sinica-English Edition*. 2020;94(3):612–623. DOI: 10.1111/1755-6724.14529

24. Jiang Y., Du W., Chen J., et al. Climatic and Topographical Effects on the Spatiotemporal Variations of Vegetation in Hexi Corridor, Northwestern China. *Diversity*. 2022;14(5):370. DOI: 10.3390/d14050370

25. Yang W., Wang Y., Webb A., et al. Influence of climatic and geographic factors on the spatial distribution of Qinghai spruce forests in the dryland Qilian Mountains of Northwest China. *Science of the Total Environment*. 2018;612:1007–1017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.180

26. Xu H., Wang Y., Guan H., et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis. *Remote Sensing*. 2019;11(20):2345. DOI: 10.3390/rs11202345

27. Zhang H., Song J., Li M., et al. Eco-environmental quality assessment and cause analysis of Qilian Mountain National Park based on GEE. *Chinese Journal of Ecology*. 2021;40(6):1883–1894. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202106.034

28. Xv H., Wang M., Shi T., et al. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI). *Ecological Indicators*. 2018;93:730–740. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.05.055

29. Falk D., van Mantgem P., Keeley J., et al. Mechanisms of forest resilience. *Forest Ecology and Management*. 2022;512:120129. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120129

30. Opsomer J. D., Breidt F. J., Moisen G. G., et al. Model-assisted estimation of forest resources with generalized additive models. *Journal of the American Statistical Association*. 2007;102(478):400–409. DOI: 10.1198/016214506000001491

31. Loozen Y., Rebel K. T., de Jong S. M., et al. Mapping canopy nitrogen in European forests using remote sensing and environmental variables with the random forests method. *Remote Sensing of Environment*. 2020;247:111933. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111933

32. Huang Q., Peng L., Huang K., et al. Generalized additive model reveals nonlinear trade-offs/synergies between relationships of ecosystem services for mountainous areas of Southwest China. *Remote Sensing*. 2022;14(12):2733. DOI: 10.3390/rs14122733

33. Gruba P., Socha J. Exploring the effects of dominant forest tree species, soil texture, altitude, and pH_{H2O} on soil carbon stocks using generalized additive models. *Forest Ecology and Management*. 2019;447:105–114. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.05.061

34. Ma X., Zhang J., Wang P., et al. Estimating the nonlinear response of landscape patterns to ecological resilience using a random forest algorithm: Evidence from the Yangtze River Delta. *Ecological Indicators*. 2023;153:110409. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110409

35. Ye T., Zhao N., Yang X., et al. Improved population mapping for China using remotely sensed and points-of-interest data within a random forests model. *Science of the Total Environment*. 2019;658:936–946. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.276
36. Esteban J., McRoberts R., Fernández-Landa A., et al. Estimating forest volume and biomass and their changes using random forests and remotely sensed data. *Remote Sensing*. 2019;11(16):1944. DOI: 10.3390/rs11161944
37. Ghorbanian A., Mohammadzadeh A., Jamali S. Linear and Non-Linear Vegetation Trend Analysis throughout Iran Using Two Decades of MODIS NDVI Imagery. *Remote Sensing*. 2022;14(15):3683. DOI: 10.3390/rs14153683
38. Nichol J. E., Abbas S. Evaluating Plantation Forest vs. Natural Forest Regeneration for Biodiversity Enhancement in Hong Kong. *Forests*. 2021;12(5):593. DOI: 10.3390/f12050593
39. Mengist W., Soromessa T. Assessment of forest ecosystem service research trends and methodological approaches at global level: a meta-analysis. *Environmental Systems Research*. 2019;8:22. DOI: 10.1186/s40068-019-0150-4
40. Pretzsch H., Zenner E. Toward managing mixed-species stands: from parametrization to prescription. *Forest Ecosystems*. 2017;4:19. DOI: 10.1186/s40663-017-0105-z
41. Xu W., Zhou P., González-Rodríguez M.Á., et al. Changes in Relationship between Forest Biomass Productivity and Biodiversity of Different Type Subtropical Forests in Southern China // *Forests*. 2024;15(3):410. DOI: 10.3390/f15030410
42. Jin A., Xiong K., Hu J., et al. Remote Sensing Ecological Quality and Its Response to the Rocky Desertification in the World Heritage Karst Sites. *Land*. 2024;13(4):410. DOI: 10.3390/land13040410

The article was submitted 20.05.2024; approved after reviewing 10.06.2024; accepted for publication 20.06.2024

Information about the authors

Yibo Wang – Postgraduate student, Chair of Silviculture and Forest Inventory, Volga State University of Technology. Research interests – forest remote sensing and GIS. Author of 8 scientific publications. <https://www.researchgate.net/profile/Yibo-Wang-36>

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 190 scientific publications and textbooks. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5330-9990>; SPIN: 9202-6359

Jinming Sha – Professor of remote sensing, Head of Department of Geography information, Head of China-Europe Center for Environment Land Landscape Management, Fujian Normal University, Fuzhou, China. Research interests – forest remote sensing and GIS. Author of 150 scientific publications. <https://www.researchgate.net/profile/Jinming-Sha>

Oleg N. Vorobyov – 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 100 scientific publications and textbooks. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4897-677X>; SPIN: 2870-0763

Jinliang Wang – Ph. D., Professor, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, China; member of the Council of Natural Resources Society of China; member of Yunnan Wetland Protection Expert Committee. Research interests – the application of remote sensing technology in resources and environment. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7202-646X>

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 16 scientific publications. SPIN: 1356-4021

Contribution of the authors:

Yibo Wang – conceptualisation; methodology; software; validation; formal analysis; data curation; original draft preparation; visualisation; funding acquisition.

Eldar A. Kurbanov – conceptualisation; methodology; formal analysis; data curation; original draft preparation; supervision; funding acquisition.

Jinming Sha – validation; data curation; review and editing; supervision.

Oleg N. Vorobyov – methodology; formal analysis.

Jinliang Wang – data curation; review and editing; supervision.

Denis M. Dergunov – software; validation; visualization.

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

All authors read and approved the final manuscript.

Научная статья

УДК 630*52:630*174.754

<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.64>

EDN: BQLZSG

Оценка экологического состояния лесных экосистем коридора Хэси с использованием временных рядов индекса RSEI

И. Ван¹, Э. А. Курбанов^{1✉}, Д. Ша², О. Н. Воробьев¹, Д. Ван³, Д. М. Дергунов¹

¹ Центр устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов,

Поволжский государственный технологический университет,

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

² Колледж географии, Фуцзяньский педагогический университет,

Китайская Народная Республика, 350007, Фучжоу, Шансан Роуд, 8

³ Факультет географии, Юньнаньский педагогический университет,

Китайская Народная Республика, 650500, Куньмин, 121 Авеню, 298

kurbanovea@volgatech.net

Аннотация. *Введение.* В исследовании проведён глубокий анализ данных временных рядов экологического индекса дистанционного зондирования (англ. Remote Sensing Ecological Index, RSEI) лесов на территории коридора Хэси (Ганьсуский коридор, КНР) с 2000 по 2023 гг. с использованием нелинейной аппроксимации кривых для выявления тенденций изменения и характеристик лесных экосистем региона. *Цель исследования* – осуществить оценку и прогнозирование экологических тенденций состояния лесов при использовании временных рядов спутниковых данных и нелинейных зависимостей. Необходимо проанализировать взаимосвязь между высотой над уровнем моря и типом лесов исследуемого региона, а также влияние этих параметров на экологическое состояние лесов на основе объединения обобщённой аддитивной модели (англ. Generalized Additive Model, GAM) с анализом IncMSE модели случайного леса (англ. Random Forest, RF). *Результаты* указывают на значительную корреляцию между значениями RSEI леса и высотой над уровнем моря. Леса на больших высотах демонстрируют лучшую экологическую стабильность и более высокие значения RSEI, что свидетельствует о более высоком качестве окружающей среды. Естественные леса, характеризующиеся богатым биоразнообразием и сложной структурой, неизменно показывают самые высокие значения RSEI в различных экологических зонах, что подчёркивает их ключевую роль в поддержании экологического баланса и предоставлении экосистемных услуг. В то же время искусственные леса, расположенные преимущественно на более низких высотах и часто вблизи деятельности человека, характеризуются линейными и стабильными временными закономерностями с более низкими значениями индекса RSEI. *Заключение.* Выявлены значительные временные колебания индекса RSEI, особенно в 2002, 2010 и 2017 гг., с заметной тенденцией к уменьшению периодов колебаний с течением времени, что, вероятно, отражает влияние предпринятых в последнее время усилий по сохранению и восстановлению лесов в КНР. Настоящее исследование оригинально сочетает анализ нелинейных моделей с использованием экологических индексов с целью обеспечить комплексную основу для понимания и прогнозирования изменений в лесных экосистемах и предоставить важнейшую аналитическую информацию для выработки будущих стратегий сохранения и управления, прежде всего в районе коридора Хэси.

Ключевые слова: лесная экосистема; RSEI; обобщённая аддитивная модель (GAM); случайный лес; анализ IncMSE; временной анализ; коридор Хэси

Благодарности: авторы благодарны анонимным рецензентам за их ценные отзывы и рекомендации по улучшению первоначальной версии статьи.

Финансирование: работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-16-00094, <https://rscf.ru/project/22-16-00094/>; Китайский стипендиальный совет, грант № 202110280009.

Для цитирования: Ван И., Курбанов Э. А., Ша Д., Воробьев О. Н., Ван Д., Дергунов Д. М. Оценка экологического состояния лесных экосистем коридора Хэси с использованием временных рядов индекса RSEI // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 64–81. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.64>; EDN: BQLZSG

Статья поступила в редакцию 20.05.2024; одобрена после рецензирования 10.06.2024; принята к публикации 20.06.2024

Информация об авторах

ВАН Ибо – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС, мониторинг лесных экосистем. Автор восьми научных публикаций. <https://www.researchgate.net/profile/Yibo-Wang-36>

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 лесопользование, дистанционное зондирование лесов и ГИС, биологическая продуктивность лесных экосистем, поглощение углерода лесными экосистемами. Автор 190 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5330-9990>; SPIN-код: 9202-6359

ША Джинминг – профессор, заведующий кафедрой геоинформационных систем, руководитель Китайско-Европейского центра по управлению природными и ландшафтными ресурсами, Фучжоу, Китай. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС. Автор 150 научных публикаций. <https://scholar.google.com/scholar?q=Jinming%20Sha>

ВОРОБЬЁВ Олег Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС, поглощение углерода лесными экосистемами, мониторинг лесных экосистем. Автор 100 научных публикаций. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4897-677X>; SPIN-код: 2870-0763

ВАН Джинлианг – доктор философии, профессор географического факультета Юньнаньского педагогического университета, Куньмин, Китай. Область научных интересов – применение технологий дистанционного зондирования в области ресурсов и окружающей среды. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7202-646X>

ДЕРГУНОВ Денис Михайлович – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов и ГИС. Автор 16 научных публикаций. SPIN-код: 1356-4021

Вклад авторов:

Ван И. – концепция; методика; программное обеспечение; валидация; данные, формальный анализ; проверка данных; подготовка статьи; визуализация; финансирование.

Курбанов Э. А. – концепция; методика; программное обеспечение; данные, формальный анализ; проверка данных; подготовка статьи; руководство; финансирование.

Ша Д. – валидация; проверка данных; редактирование; руководство;

Воробьев О. Н. – методика; данные, формальный анализ.

Ван Д. – проверка данных; редактирование; руководство.

Дергунов Д. М. – программное обеспечение; валидация; визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Научная статья
УДК 502.313
<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.82>
EDN: CXOYBY

Изменения повторяемости сухих гроз при современном потеплении климата на примере некоторых районов Якутии и Красноярского края

А. В. Холопцев

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, 662972, Железногорск, ул. Северная, 1
knd@sibpsa.ru

Аннотация. *Введение.* Отличительной особенностью сухих гроз является отсутствие при этих явлениях атмосферных осадков, что способствует развитию лесных пожаров, возникающих в результате ударов молний, поджигающих горючий материал. На лесопокрытых, но ненаселённых территориях такие грозы являются основной причиной образования пожаров. Принято считать, что при усилении засушливости местного климата их повторяемость повышается. Тем не менее, особенности её изменений в период современного потепления климата над теми или иными регионами России, обладающими значительными лесными ресурсами, изучены недостаточно. Поэтому их выявление для регионов, расположенных в Сибири, является актуальной проблемой экологии и безопасности при чрезвычайных ситуациях. *Целью* работы являлось выявление тенденции межгодовых изменений повторяемости сухих гроз в различные летние месяцы и в целом за грозоопасные сезоны 1961–2023 гг. для Якутии и Красноярского края. *Объект и методы исследования.* Объектом исследования являлись изменения повторяемости сухих гроз и среднемесячных температур воздуха в приземном слое атмосферы, оценённых для месяцев грозоопасных сезонов, которые произошли за период с 1961 по 2023 гг. Исследование осуществлено с применением метода корреляционного анализа и критерия Стьюдента. *Результаты.* Установлено, что тенденции межгодовых изменений повторяемости сухих гроз определяются не только вариациями местного климата, но и географическим положением изучаемых территорий. Для пунктов, расположенных на Приленском плато, в бассейнах рек Лена и Яна, для любых летних месяцев климатические нормы повторяемости сухих гроз за рассматриваемый период увеличились значительно быстрее, чем повторяемости всех гроз. Для пунктов Оймяконского нагорья и Среднесибирского плоскогорья этой особенности не выявлено. *Выводы.* Показано, что синхронная корреляция вариаций повторяемости сухих гроз и термического режима территории значимой является не повсеместно, что указывает на наличие существенного влияния на неё иных, предположительно ландшафтных факторов.

Ключевые слова: сухая гроза; лесной пожар; повторяемость; чрезвычайная ситуация; Республика Саха (Якутия); Красноярский край; тенденция; синхронная связь

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Холопцев А. В. Изменения повторяемости сухих гроз при современном потеплении климата на примере некоторых районов Якутии и Красноярского края // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2024. № 2 (62). С. 82–97. <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.82>; EDN: CXOYBY

Введение

Важной разновидностью гроз, характерной для многих регионов Северного умеренного климатического пояса, являются сухие, при которых атмосферных осадков на соответствующих территориях практически не наблюдается [1, 2]. При таких грозах тушение атмосферными осадками возгораний горючего материала, которые возникают при попадании в него молний, не происхо-

дит [3]. В таких случаях инициированные грозами лесные пожары могут развиваться до масштабов, представляющих значительную опасность для населения и экономики [4], поэтому выявление современных тенденций изменений повторяемости сухих гроз (далее ПГС) над теми или иными лесопокрытыми территориями – актуальная проблема метеорологии, климатологии и безопасности при чрезвычайных ситуациях.

© Холопцев А. В., 2024

Наибольший интерес решение рассматриваемой проблемы представляет для регионов, обладающих значительными лесными ресурсами, существенная часть которых расположена на территориях, относящихся к зонам контроля [8] (рис. 1).

В России важнейшими среди таких регионов являются Республика Саха (Якутия) (далее Якутия) и Красноярский край, где суммарные площади упомянутых территорий максимальны [5–7]. Расположение таких территорий, а также районов с другими режимами противопожарных мероприятий, согласно [8], показаны на рис. 1.

Как следует из рис. 1, в Якутии и Красноярском крае к зонам контроля относятся преобладающие части их территорий.

На территории Якутии зона контроля разделена на две части – северную и южную. Её северная часть образована Центрально-Якутской низменностью. Южная часть рассматриваемой зоны представлена Алданским нагорьем. В Красноярском крае зона контроля занимает всю северо-восточную часть его территории, принадлежащую в основном Эвенкийскому району, на которой находится

Среднесибирское плоскогорье. Поэтому объектом исследования в данной работе выбрана грозовая активность на территории Красноярского края и Республики Саха Якутия.

Упомянутая территория ограничена рекой Енисей на западе, побережьями морей Карского, Лаптевых и Восточносибирского на севере, горными хребтами, разделяющими водосборные бассейны Тихого и Северного Ледовитого океана на востоке, а также Восточным Саяном, Патомским, Алданским нагорьями на юге. Её часть, расположенную между реками Енисей и Лена, занимает физико-географическая страна Средняя Сибирь, образованная Среднесибирским плоскогорьем, Северо-Сибирской и Центрально-Якутской низменностью, горами Бырранга, плато Путоран, Анабарским и Приленским, а также Алданским нагорьем. Часть территории Якутии, расположенная к востоку от реки Лена, является в основном гористой. Здесь расположены горные хребты Верхоянский, Черского и Момский, а также Эльгинское плоскогорье, к которым с севера прилегают Яно-Индигорская и Колымская низменности.

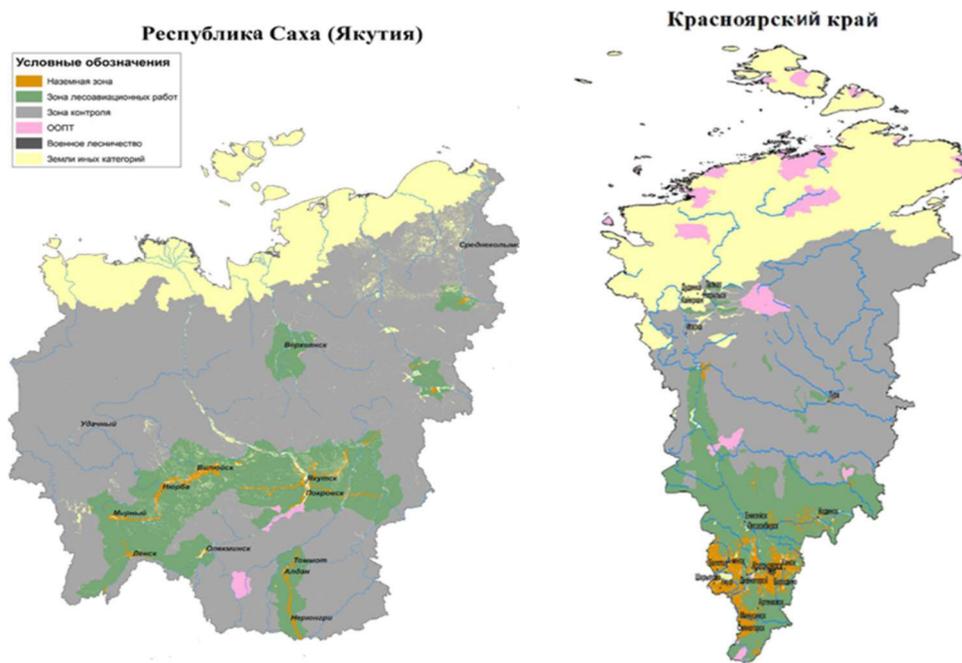


Рис. 1. Расположение участков территории Якутии и Красноярского края с тем или иным режимом противопожарных мероприятий, согласно [8]

Fig. 1. Location of the areas with particular fire prevention regimes on the territory of Yakutia and Krasnoyarsk Krai according to [8]

Исследуемая территория относится к ландшафтной зоне бореальной тайги [9] и характеризуется лесистостью не менее 50 %. Грозы здесь возникают в период с мая по сентябрь [10–12].

По оценкам [13], лишь около 2 % лесных пожаров, которые возникали на территориях Якутии и Красноярского края в 2005–2022 гг., были вызваны грозами.

Следует отметить, что наблюдения, на которых основаны такие оценки, осуществлялись лишь на населённых территориях, где главной причиной лесных пожаров является человеческая деятельность. К тому же учитывались все грозы, возникавшие над рассматриваемыми территориями, а не только сухие грозы, поэтому упомянутые оценки значимости влияния изменений ПГС на горимость лесов Якутии и Красноярского края целесообразно рассматривать как оценки снизу.

Выявлению закономерностей образования над изучаемой территорией гроз посвящены работы многих отечественных авторов [2, 11, 12, 14–22]. Ими установлено, что над её территорией грозы образуются при конвективных процессах в кучево-дождевых облаках Св. Такие процессы при потеплении климата и прочих равных условиях активизируются [14, 23–25].

Менее изучены условия, при которых образующиеся грозы являются сухими. Такие грозы возникают, если воздух под соответствующими облаками Св является настолько сухим и тёплым, что выпадающие из них капли дождя успевают полностью испариться, не долетев до земной поверхности [1, 2, 17, 26, 27].

Очевидно, что при прочих равных условиях потепление и усиление засушливости местного климата приводит к увеличению ПГС над рассматриваемой местностью. Вместе с тем, установлено, что за период современного потепления глобального климата средняя интенсивность атмосферных осадков на изучаемой территории увеличилась [28–30].

Относительная влажность воздуха под грозовыми облаками зависит не только от его температуры, но и от интенсив-

ности транспирации в фитоценозах, развивающихся на соответствующей местности. Последняя существенно зависит от состояния этих фитоценозов и пропорциональна суммарной площади зелёного листа, которая за период вегетации изменяется. Зависит она также от увлажнённости почвенных слоёв, питающих влагой корневые системы растений, которая в бореальной тайге развивается на вечной мерзлоте и потому за летний сезон может изменяться, поэтому изменения ПГС над территориями рассматриваемых регионов России могут значимо зависеть от факторов не только климатических, но и ландшафтных.

Следовательно, нами выдвинута гипотеза о том, что над некоторыми участками территорий изучаемых регионов России за период современного потепления глобального климата ПГС повысилась, межгодовые изменения этого показателя над местностями с разными типами ландшафтов различались, а их корреляция с синхронными вариациями средних температур воздуха была значимой не повсеместно.

В некоторых населённых пунктах Якутии и Красноярского края в период современного потепления глобального климата [28] мониторинг грозовой активности производился систематически [31], что позволяет оценить справедливость для них выдвинутого предположения. Тем не менее, ранее тенденции изменений ПГС над такими пунктами изучены не были. Не выявлены также условия, при которых межгодовые изменения среднемесячных температур воздуха (далее СМТ), соответствующие месяцам пожароопасного сезона, в упомянутый период были значимо связаны с вариациями ПГС над какими-либо пунктами.

Всё это не позволяет учесть результаты мониторинга грозовой активности над указанными регионами России при прогнозировании рисков возникновения на их территориях лесных пожаров, а также планировании основных мероприятий соответствующих противопожарных

подразделений. Следовательно, проверка выдвинутой гипотезы и выявление участков территории Якутии и Красноярского края, для которых она справедлива, представляет не только теоретический, но и немалый практический интерес, поэтому предметом исследования в данной работе являются изменения повторяемости сухих гроз при современном потеплении глобального климата на территории Красноярского края и Якутии.

Целью данной работы является выявление районов Якутии и Красноярского края, для которых выдвинутая гипотеза справедлива.

Для её достижения решены следующие **задачи**:

1) выявление особенностей межгодовых изменений ПГС над пунктами территорий Якутии и Красноярского края, которые расположены на местностях с различными типами ландшафтов, как для грозоопасного сезона в целом, так и для различных его месяцев;

2) определение для этих пунктов изменений климатических норм рассматри-

ваемых показателей для современного климатического периода (1991–2020 гг.) по отношению к базовому (1961–1990 гг.);

3) оценка значимости синхронной корреляции межгодовых изменений ПГС для того или иного месяца и пункта, с соответствующими вариациями СМТ.

Материалы и методы

При решении рассматриваемых задач как источник фактического материала о ПГС и СМТ использована информация [31], которая основана непосредственно на результатах наблюдений, проводимых соответствующими гидрометеорологическими станциями Росгидромета.

При выборе репрезентативных пунктов учитывались карты ландшафтов России [32], а также расположения гидрометеорологических станций, на которых в период 1961–2023 гг. проводился систематический мониторинг изменений температур воздуха и грозовой активности [32]. Сведения о физико-географических районах Якутии и Красноярского края, для которых выбранные пункты являлись репрезентативными, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Пункты Якутии и Красноярского края, а также физико-географические районы, для которых они являются репрезентативными

Table 1. Locations in Yakutia and Krasnoyarsk Krai and the physiographic regions they are representative of

Пункт	Широта (°)	Долгота (°)	Абс. высота (м)	Район, для которого пункт репрезентативен
Алдан	58,61	125,36	650	Алданское нагорье, бассейн реки Алдан
Ванавара	60,33	102,26	259	Среднесибирское плоскогорье, бассейн реки Подкаменной Тунгуски
Верхоянск	67,55	133,38	127	Яно-Индигирская низменность, бассейн реки Яны
Вилуйск	63,76	121,61	110	Южная часть Центрально-Якутской низменности, бассейн реки Вилуй
Ленск	60,71	114,88	242	Приленское плато
Оймякон	63,25	143,15	741	Оймяконское нагорье
Сангар	63,96	127,46	80	Долина реки Лены в среднем течении
Туруханск	65,78	87,95	35	Долина реки Енисей в нижнем течении, западные предгорья Среднесибирского плоскогорья
Якутск	62,01	129,75	95	Долина реки Лены в среднем течении (в том числе долина Туймаада)

Как видно из табл. 1, пункты Ванавара и Туруханск относятся к Красноярскому краю и окружены его территориями, которые преимущественно относятся к зоне контроля (см. рис. 1). Прочие пункты, упомянутые в этой таблице, относятся к Якутии, а физико-географические районы, к которым они относятся, занимают существенную и наиболее населённую часть территории этого региона России. Следует отметить, что выбранные пункты репрезентативны лишь для соответствующих районов, указанных в табл. 1. Репрезентативны для таких районов и пункты Туруханск и Алдан, несмотря на то, что они расположены вблизи границ соответствующих физико-географических стран.

При выборе пунктов, репрезентативных для того или иного района, отдано предпочтение тем, где временной ряд наблюдений за грозами охватывал период 1961–2023 гг.

Из табл. 1 следует, что районы, которым соответствуют выбранные пункты, в совокупности перекрывают значительную часть территории Республики Саха (Якутия) и Красноярского края, поэтому результаты исследований, которые могут быть получены для таких пунктов, возможно рассматривать как представительные для всей изучаемой территории.

При разработке методики исследования учитывалось, что значение повторяемости события принято определять, как отношение количества суток, принадлежащих к изучаемому отрезку времени, в течение которых оно имело место, к его общей продолжительности этого отрезка [33]. Поэтому для всех пунктов, упомянутых в табл. 1, каждого грозоопасного сезона и всех его месяцев, по указанному фактическому материалу определены значения ПГС, а также повторяемости всей совокупности гроз (далее ПГ). Также для них вычислены значения СМТ.

Из этих показателей сформированы временные ряды ПГС, ПГ и СМТ.

При решении первой задачи сопоставлялись построенные по этим рядам зависимости ПГС и ПГ от времени, которые соответствуют различным изучаемым пунктам.

При решении второй задачи для каждого пункта грозоопасного сезона в целом и каждого его месяца оценивались тенденции изменений ПГС и ПГ за современный период 2012–2023 гг., а также климатических норм этих показателей за период современного потепления климата (1961–2020 гг.).

Тенденция изменений ПГС или ПГ признавалась значимой, если достоверность такого вывода составляла не менее 0,95.

Принято допущение о том, что отклонения членов ряда от соответствующего тренда подчиняются нормальному закону, поэтому решение о значимости выявленной тенденции выносилось, если выполнялось условие:

$$39A > 1,65СКО,$$

где A – угловой коэффициент линейного тренда рассматриваемого временного ряда; $СКО$ – среднеквадратическое отклонение членов этого ряда от соответствующего тренда.

При выявлении тенденций изменения климатических норм ПГС или ПГ значения этих показателей вычислялись для современного и базового климатического периода, а также определялось значение их разностей.

При решении третьей задачи, как характеристика силы связи между временными рядами ПГС, ПГ, а также СМТ, рассматривалось значение коэффициента их корреляции, поэтому при решении первой задачи применён метод корреляционного анализа.

Изучались связи между временными рядами ПГС, ПГ, а также рядами СМТ для каждого населённого пункта, упомянутого в табл. 1.

Предполагалось, что изучаемые временные ряды соответствуют периоду длиной 62 года. При оценке значимости синхронных связей между соответствующими рядами применялся критерий Стьюдента.

При определении порогового уровня коэффициента корреляции учитывалось наименьшее количество степеней свободы сопоставляемых временных рядов. Упомянутое количество определялось для

каждого ряда по его автокорреляционной функции. Его значение для всей совокупности изучаемых рядов составило 62.

Перед вычислением значения коэффициента корреляции рассматриваемых временных рядов в каждом из них скомпенсирован линейный тренд, коэффициенты которого определены по методу наименьших квадратов.

Решение о значимости корреляции сопоставляемых рядов принималось, если достоверность этого статистического вывода превосходила 0,95 (значение модуля соответствующего порога корреляции составляет 0,25).

Как следует из рассмотренной методики, количество репрезентативных пунктов на территориях Якутии и Красноярского края невелико. К тому же проверку допущения о том, что отклонения членов каждого изучаемого ряда от соответствующего тренда подчиняются нормальному закону, не позволяет осуществить небольшая его длина, поэтому выводы, которые могут быть получены с её применением, следует рассматривать как носящие лишь качественный характер.

Результаты исследования и их анализ

В соответствии с изложенной методикой исследования, при решении первой задачи для каждого рассматриваемого пункта территорий Якутии и Красноярского края, каждого грозоопасного сезона 1961–2023 гг., а также каждого относящегося к нему месяца вычислены значения ПГС и ПГ. Из полученных результатов сформированы временные ряды, отражающие зависимости количества любых гроз и сухих гроз, а также ПГС и ПГ от времени.

Их анализ показал, что сухие грозы над изучаемыми пунктами наблюдались только в месяцы с июня по август, хотя прочие грозы регистрировались также в мае и сентябре. Зависимости их количества от времени представляют собой сложные колебания. При этом наиболее мощная квазидвухлетняя мода их спектра, характерная также для собственной изменчивости многих характеристик атмо-

сферы, практически маскирует все прочие. Для выявления зависимостей от времени суммы прочих мод изучаемых процессов, упомянутую моду необходимо подавить. Для этого осуществлено сглаживание всех сформированных рядов ПГС и ПГ в скользящем окне длиной пять лет.

Как примеры на рис. 2 приведены зависимости от времени количества любых гроз и сухих гроз, соответствующих июню и июлю, а также всему грозоопасному сезону, а также ПГС и ПГ для всего этого сезона, которые сглажены в скользящем окне длиной пять лет, для п. Ленск (Якутия).

Из рис. 2 видно, что между одноимёнными зависимостями от времени количества всех гроз (КГ) и сухих гроз (КГС) для пункта Ленск имеет место существенное подобие. Все рассматриваемые зависимости являются возрастающими, а присутствующие в них тренды весьма близки к линейным.

Столь же подобны аналогичные зависимости, соответствующие прочим рассматриваемым пунктам, хотя присутствующие в них тренды линейными не являются.

Подобие одноимённых зависимостей от времени ПГС и ПГ для месяцев июнь–август, а также в целом за грозоопасный сезон подтверждает табл. 2, где представлены значения коэффициента корреляции соответствующих временных рядов.

Из табл. 2 следует, что значения коэффициента корреляции временных рядов ПГС и ПГ для всего грозоопасного сезона и для каждого его месяца, соответствующие всем рассматриваемым пунктам, кроме пункта Вилюйск, превышают 0,25 (выбранный порог их значимости). Для пункта Вилюйск значение этого коэффициента для июня равно 0,242, для прочих летних месяцев и сезона в целом также превышает 0,25.

Следовательно, связи между соответствующими временными рядами могут быть признаны значимыми для всех месяцев и грозоопасного сезона в целом, а также для всех рассматриваемых пунктов, кроме пункта Вилюйск для июня.

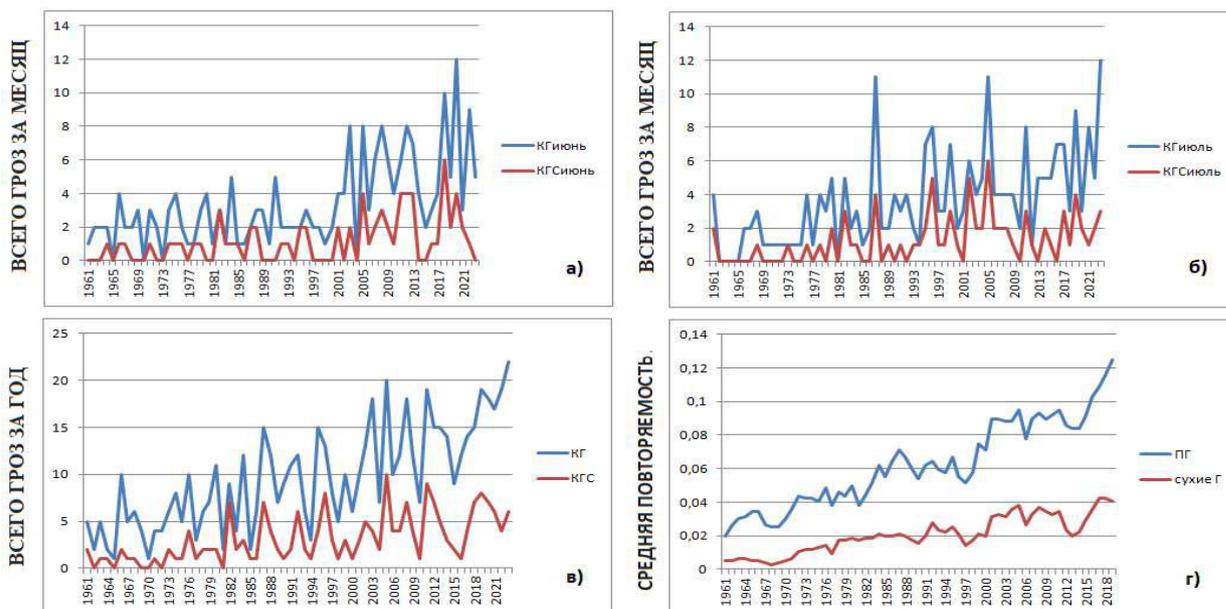


Рис. 2. Межгодовые изменения КГ и КГС над городом Ленск
 а) количество гроз за июнь; б) количество гроз за июль; в) количество гроз за год (грозоопасный сезон);
 г) СПГ и ПГ за тот же сезон, оценённые в скользящем окне длиной 5 лет
 Fig. 2. Interannual variations in the number of thunderstorms (TN) and dry thunderstorms (DTN) over the city of Lensk
 а) TN in June; б) TN in July; в) TN during a year (thunderstorm season); д) recurrence of dry thunderstorms (DTR)
 and recurrence of thunderstorms (TR) during the same season, estimated using a sliding window with a length of 5 years

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции временных рядов ПГС и ПГ для всех репрезентативных пунктов Якутии и Красноярского края
 Table 2. Values of the correlation coefficient of the DTR and TR time series for all representative locations in Yakutia and Krasnoyarsk Krai

Пункт	Июнь	Июль	Август	Лето
Алдан	0,291	0,613	0,559	0,621
Верхоянск	0,517	0,899	0,883	0,710
Вилуйск	0,242	0,542	0,589	0,725
Ленск	0,711	0,765	0,514	0,845
Оймякон	0,544	0,762	0,695	0,711
Сангар	0,525	0,453	0,489	0,720
Якутск	0,572	0,554	0,454	0,595
Ванавара	0,499	0,733	0,549	0,738
Туруханск	0,581	0,455	0,300	0,652

Зависимости от времени ПГ и ПГС для всего грозоопасного сезона над репрезентативными пунктами Якутии, которые сглажены в скользящем окне длиной пять лет, приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что зависимости от времени сглаженных в скользящем окне длиной пять лет изменений ПГ

и ПГС для всего грозоопасного сезона, которые соответствуют всем рассматриваемым пунктам, носят колебательный характер. При этом рис. 3, а показывает, что тренды, присутствующие в этих зависимостях, для пункта Алдан, как и для пункта Ленск, близки к линейным.

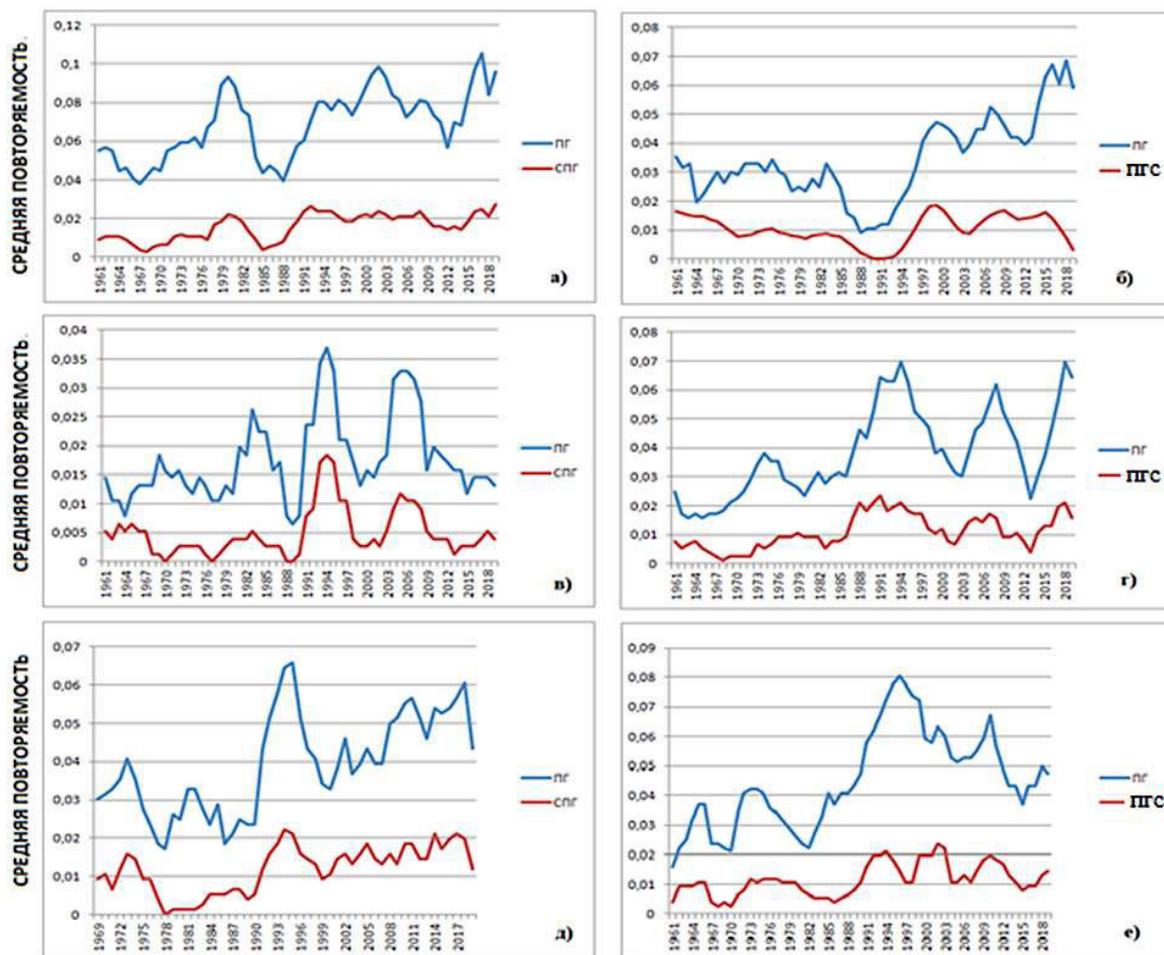


Рис. 3. Зависимости от времени сглаженных в скользящем окне длиной пять лет изменений ПГ и ПГС для всего грозоопасного сезона над репрезентативными пунктами Якутии

a) Алдан; б) Оймякон; в) Верхоянск; г) Вилюйск; д) Сангар; е) Якутск

Fig. 3. Time dependences of TR and DTR changes smoothed in a 5-year sliding window for the entire thunderstorm season over representative locations in Yakutia
a) Aldan; b) Oymyakon; c) Verkhoyansk; d) Vilyuysk; e) Sangar; f) Yakutsk

Рис. 3, б свидетельствует о том, что для пункта Оймякон тренды, присутствующие в тех же зависимостях, являются билинейными. Для базового климатического периода 1961–1990 гг. они являются убывающими, а для современного климатического периода 1991–2020 гг. – возрастающими.

Как следует из рис. 3, в, для пункта Верхоянск рассматриваемые тренды также являются билинейными, но возрастающими они являются в период 1961–1993 гг., а в последующий период убывающими.

Рис. 3, г позволяет заключить, что для пункта Вилюйск изучаемые тренды также билинейны. В период 1961–1990 гг. они

возрастающие, а после 1991 г. значимыми не являются (колебания происходят на практически неизменном уровне).

Как видно из рис. 3, д, изучаемые тренды, соответствующие пункту Сангар, близки к линейным.

Из рис. 3, е следует, что для пункта Якутск рассматриваемые тренды также являются билинейными. Для базового климатического периода 1961–1990 гг. они являются возрастающими, а для современного климатического периода 1991–2020 гг. – убывающими.

Таким образом, из рис. 3 следует, что для рассматриваемых частей территории

Якутии тенденции изменений ПГС и ПГ, характерные для современного климатического периода (1991–2020 гг.), различны.

Для пунктов Алдан, Оймякон и Сангар эти тенденции являются возрастающими, а для пунктов Верхоянск и Якутск убывающими.

Как видим, тенденции изменений рассматриваемых показателей в период 2012–2023 гг. существенно различаются.

Оценки за 2012–2023 гг. значений углового коэффициента линейного тренда сглаженных изменений ПГС и ПГ для всего грозоопасного сезона, соответствующие рассматриваемым пунктам и являющиеся значимыми, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Оценки за 2012–2023 гг. значений углового коэффициента линейного тренда сглаженных изменений ПГС и ПГ для всего грозоопасного сезона, соответствующие рассматриваемым пунктам и являющиеся значимыми

Table 3. The 2012–2023 estimates of the values of the angular coefficient of the linear trend in the smoothed DTR and TR changes for the entire thunderstorm season; the estimates correspond to the studied locations and are significant

Пункт	Тренд ПГ	Тренд СПГ
Алдан	0,00562	0,00185
Верхоянск	-0,00042	0,00028
Ленск	0,00621	0,00354
Якутск	0,00036	-0,00025
Оймякон	0,00349	-0,00148
Вилуйск	0,00650	0,00201
Сангар	0,00031	0,00013

Табл. 3 показывает, что для периода 2012–2023 гг. значимые тенденции к увеличению ПГ, которые оценены за весь грозоопасный сезон, соответствуют участкам территории всего бассейна реки Лена, а также Оймяконского нагорья. При этом значимые тенденции к увеличению ПГС за те же годы выявлены для лишь Алданского нагорья, Приленского плато, а также бассейнов рек Яна и Виллой. Следовательно, на территориях соответствующих районов Якутии вклады в горимость их лесов, обусловленные возникновением над ними сухих гроз, в современном периоде увеличиваются.

Аналогичные особенности характерны для сглаженных зависимостей от времени СПГ и ПГ за весь грозоопасный сезон, соответствующих репрезентативным пунктам Красноярского края. Упомянутые зависимости представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, для репрезентативных пунктов Красноярского края зависимости от времени сглаженных в скользящем окне длиной пять лет изменений ПГ и ПГС для всего грозоопасного сезона также являются сложными колебаниями. При этом для пункта Ванавара присутствующие в них тренды являются билинейными (для базового климатического периода убывающими, а для современного климатического периода возрастающими). Для пункта Туруханск тренды, присутствующие в обеих зависимостях, близки к линейным.

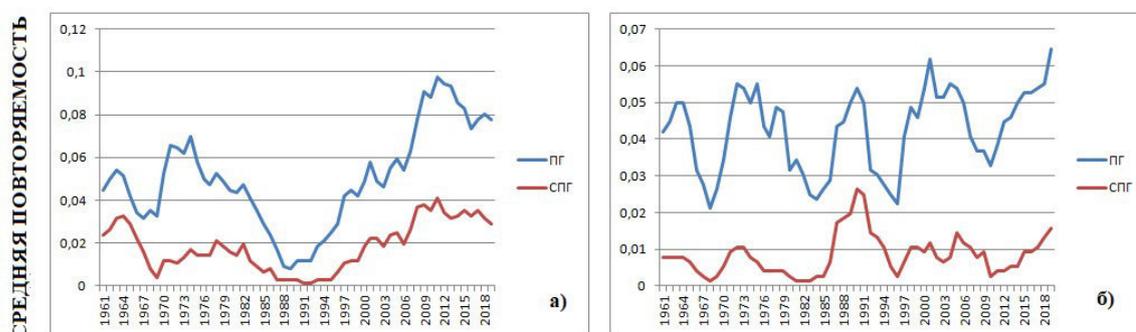


Рис. 4. Зависимости от времени сглаженных в скользящем окне длиной пять лет изменений ПГ и ПГС для всего грозоопасного сезона, соответствующие репрезентативным пунктам Красноярского края:

а) Ванавара; б) Туруханск

Fig. 4. Time dependences of TR and DTR changes smoothed in a 5-year sliding window for the entire thunderstorm season, in correspondence with the representative locations of the Krasnoyarsk Krai: a) Vanavara; b) Turukhansk

Таблица 4. **Оценки климатических норм ПГ и ПГС для летних месяцев в изучаемых пунктах Якутии и Красноярского края для базового и современного климатического периода**

Table 4. Estimates of TR and DTR climatic norms for summer months in the studied locations of Yakutia and Krasnoyarsk Krai for the baseline and current climatological periods

Пункт	1961–1990 гг.						1991–2020 гг.					
	Всего гроз			Сухих гроз			Всего гроз			Сухих гроз		
	июнь	июль	август	июнь	июль	август	июнь	июль	август	июнь	июль	август
Алдан	83	106	57	18	21	6	114	150	82	32	42	22
Верхоянск	28	27	14	5	6	4	32	44	16	11	17	2
Вилуйск	44	45	33	10	15	7	81	87	44	27	26	13
Ленск	62	67	51	19	18	15	135	140	74	49	55	22
Оймякон	45	61	22	13	28	4	73	76	34	20	24	11
Сангар	45	52	28	8	6	9	74	89	50	26	31	15
Якутск	56	58	25	14	13	7	80	112	60	27	28	14
Ванавара	66	80	53	26	27	19	95	98	52	36	38	20
Туруханск	35	86	49	3	15	7	61	94	48	13	28	8

Для периода 2012–2023 гг. значимые тенденции к увеличению как ПГ, так и ПГС за весь грозоопасный сезон выявлены лишь для п. Туруханск. Следовательно, вклад в горимость лесов западных предгорий Среднесибирского плоскогорья, обусловленный возникновением над ними сухих гроз, в современном периоде значимо увеличивается.

В табл. 4 для всех рассматриваемых пунктов приведены оценки климатических норм ПГ и ПГС для летних месяцев, соответствующие базовому (1961–1990 гг.) и современному (1991–2020 гг.) климатическому периоду.

Из табл. 4 следует, что за период 1961–2020 гг. климатические нормы ПГ для всех рассматриваемых пунктов и всех летних месяцев увеличились.

Климатические нормы ПГС, соответствующие всем пунктам, повысились для месяцев июнь и июль. Для августа они возросли для всех пунктов, кроме пункта Верхоянск.

Следует отметить, что климатические нормы ПГС для июня, соответствующие всем репрезентативным пунктам, кроме пункта Оймякон, по сравнению с климатическими нормами ПГ в современном климатическом периоде, увеличились более существенно.

Для июля климатические нормы ПГС для пунктов Алдан, Верхоянск, Ленск, Сангар и Якутск за период 1961–2020 гг. возросли более ощутимо, чем климатические нормы ПГ. Максимальное их увеличение и для июня, и для июля имело место для п. Сангар.

Для августа аналогичное явление выявлено для п. Алдан, Вилуйск, Ленск и Оймякон. Наибольшее увеличение климатических норм ПГС, по сравнению с климатическими нормами ПГ, для этого месяца имело место для п. Алдан.

Так как сухие грозы, проходя над лесными массивами, способны чаще вызывать в них лесные пожары, из полученных результатов следует, что вклады этих атмосферных процессов в суммарную горимость лесов районов Якутии и Красноярского края, для которых изучаемые пункты являлись репрезентативными, в современном климатическом периоде существенно увеличились.

Из сравнения табл. 4 и 3 понятно, что для репрезентативных пунктов Алданского нагорья, бассейнов рек Яна и Вилуй и Приленского плато значимые тенденции к увеличению ПГС выявлены для трёх периодов времени (1961–2020 гг., 1991–2020 гг. и 2012–2023 гг.), что позволяет предполагать их устойчивость. По-

следнее свидетельствует о том, что сценарий будущего, при котором увеличение СПГ в тех же районах продолжится, является вполне вероятным.

Аналогичный вывод справедлив и для западных предгорий Среднесибирского плоскогорья.

При решении третьей задачи осуществлён корреляционный анализ связей между временными рядами ПГ и ПГС за 1961–2023 гг., а также синхронными, по отношению к ним, рядами СМТ, для всего грозоопасного сезона и каждому его месяцу, которые соответствуют всем рассматриваемым пунктам территорий Якутии и Красноярского края. Полученные результаты для пунктов Ленск и Туруханск представлены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, для пунктов Ленск и Туруханск связи между синхронными временными рядами ПГ и СМТ, соответствующими июню, а также всему грозоопасному сезону, могут быть признаны значимыми с достоверностью не менее 0,95. Такой же вывод справедлив и в отношении связей между синхронными временными рядами ПГС и СМТ для пункта Туруханск, соответствующими июню, а также всему грозоопасному сезону.

Связи между рассматриваемыми рядами для прочих месяцев значимыми не являются.

Аналогичные закономерности выявлены и для прочих рассматриваемых репрезентативных пунктов. Месяцем, для которого корреляция рядов ПГС и СМТ является значимой для наибольше-

го количества пунктов, является июнь. Для прочих месяцев связи между этими рядами для всех пунктов значимыми не являются. Связи между рядами ПГС и СМТ для всего грозоопасного сезона значимы лишь для пунктов Алдан, Верхоянск и Туруханск.

Из этого следует, что существенное влияние на вариации ПГС, происходящие над изучаемыми районами Якутии и Красноярского края, оказывают межгодовые изменения не только температур приземного воздуха, но и его относительной влажности и другие факторы.

Как уже отмечалось выше, одной из причин изменений относительной влажности воздуха над лесными массивами рассматриваемых районов могут являться вариации характеристик их фитоценозов, влияющих на интенсивность транспирации ими влаги.

Определённое влияние на изменения ПГС над такими районами, вероятно, могут оказывать также вариации суммарных продолжительностей, проходящих над ними вторжений в низкие широты относительно сухого арктического воздуха, а также других процессов, порождающих атмосферные блокинги [34].

Таким образом, установлено, что выдвинутая гипотеза является справедливой для районов Якутии и Красноярского края, по отношению к которым рассматриваемые пункты являются репрезентативными, поэтому задачи, поставленные в данной работе, решены, а её цель достигнута.

Таблица 5. Значения коэффициента корреляции временных рядов ПГ и ПГС за 1961–2023 гг. для пунктов Ленск и Туруханск, с синхронными рядами СМТ для этих пунктов, которые соответствуют всему грозоопасному сезону, а также каждому его месяцу

Table 5. Correlation coefficient values of TR and DTR time series for 1961–2023 with regard to the Lensk and Turukhansk locations, with synchronous series of mean monthly air temperatures (MMT) for these locations, which correspond to the entire thunderstorm season and each individual month of the season

Пункт	ПГ				ПГС			
	июнь	июль	август	сезон	июнь	июль	август	сезон
Ленск	0,412	0,147	0,208	0,415	0,208	-0,098	-0,238	0,226
Туруханск	0,308	0,198	-0,092	0,284	0,289	0,146	0,016	0,256

Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты качественно соответствуют существующим представлениям о влиянии вариаций температур воздуха в приземном слое земной атмосферы на грозовую активность [2, 11, 12, 14–22], механизме образования сухих гроз [1, 2, 4, 26], а также об особенностях перемен климата Якутии и Красноярского края, которые произошли за период 1961–2020 гг. [28, 30].

При этом новыми фактами, установленными в работе, являются:

1. Для каждого месяца, в котором возможно образование сухих гроз, на территориях Якутии и Красноярского края существуют многочисленные районы, где за весь период современного потепления глобального климата (1961–2020 гг.) [25], за современный климатический период (1991–2020 гг.), а также 2012–2023 гг. ПГС значимо возростали.

2. Статистические связи межгодовых изменений ПГС с синхронными вариациями СМТ являются значимыми не повсеместно и лишь, при условии, что рассматриваемые показатели оценены за весь грозоопасный сезон, а также за июнь. Для прочих месяцев они значимыми где-либо не являются. Последнее доказывает, что наряду с термическими факторами на межгодовые и сезонные изменения ПГС значимо влияют также другие (предположительно, ландшафтные) факторы.

3. Изменения ПГС представляют собой сложные колебания, причины которых нуждаются в дополнительном изучении.

Одной из возможных их причин могут быть изменения вулканической активности в различных районах Земного шара, влияющие на прозрачность атмосферы, в том числе и над регионами Северного умеренного климатического пояса.

Другой причиной колебаний ПГС могут служить вариации солнечной активности, которые вызывают изменения потоков космических лучей, входящих в атмосферу и усиливающих ионизацию воздуха в тропосферных облаках.

В XXI веке всё более мощным фактором, влияющим на изменения ПГ и ПГС, становится перемещение Северного геомагнитного полюса, которое, в сочетании с общим ослаблением геомагнитного поля, приводит к увеличению потока космических лучей, проникающих в тропосферу, по мере сокращения расстояния, отделяющего его от территории Якутии и Красноярского края.

Вследствие нестационарности перечисленных факторов, периодичности, присутствующие в вариациях ПГ и ПГС над рассматриваемыми пунктами устойчивыми не являются, что подтвердил и спектральный анализ соответствующих временных рядов. Результаты этого анализа для всех репрезентативных пунктов отдать предпочтение какой-либо из указанных причин не позволяют.

Выводы

Выявленные закономерности межгодовых изменений повторяемости сухих гроз для всего грозоопасного сезона и рассматриваемых пунктов на территориях Республики Саха (Якутия) и Красноярского края в полной мере соответствуют существующим представлениям о причинах этих процессов.

1. Среди участков территорий упомянутых регионов, для которых исследуемые пункты могут рассматриваться как репрезентативные, существуют те, где за период современного потепления глобального климата, за весь современный климатический период, а также за интервал времени 2012–2023 гг. повторяемость сухих гроз значимо повышалась.

2. В период современного потепления глобального климата межгодовые изменения повторяемости сухих гроз, а также синхронные вариации среднемесячных температур воздуха значимо связаны между собой не всюду и лишь при условии, что указанные показатели соответствуют либо всему грозоопасному сезону, либо июню. В прочих случаях связи между этими процессами не значимы.

Актуальной проблемой в области прогнозирования повторяемости сухих гроз

и вызванных ими лесных пожаров на территориях Республики Саха (Якутия), а также Красноярского края, является со-

вершенствование технологий мониторинга относительной влажности воздуха в под-облачном слое тропосферы над ними.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Дмитриев А. Н., Кречетова С. Ю., Кочеева Н. А.* Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай: монография. Горно-Алтайск: Горно-Алтайский государственный университет, 2011. 154 с. EDN: QKKRQF
2. *Иванов В. А., Кориунов Н. А., Матвеев П. М.* Пожары от молний в лесах Красноярского Приангарья: монография. Красноярск: СибГТУ, 2004. 132 с. EDN: QKWXMB
3. *Курбатский Н. П.* О механизме возникновения лесных пожаров от молний // Лесоведение. 1976. № 3. С. 95–98.
4. *Парамонов Е. Г., Ииутин Я. Н.* Крупные лесные пожары в Алтайском крае: монография, 2-е издание, исправленное и дополненное. Барнаул: Алтайский государственный университет, 2005. 240 с. EDN: YPSALB
5. Биogeосистемы лесов и вод России: монография / И. В. Стебаев, Ж. Ф. Пивоварова, Б. С. Смоляков и др. Новосибирск: Новосибирское отделение издательства «Наука», 1993. 348 с. EDN: XUCRSH
6. *Страхов В. В., Писаренко А. И., Борисов В. А.* Леса мира и России // Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России». 2001. № 9. С. 49–63.
7. The Siberian World / Edited by J. P. Ziker, J. Ferguson, V. Davydov. Abingdon, Oxon; New York, NY: Routledge, 2023. 654 p. DOI: 10.4324/9780429354663
8. Схемы расположения Зон контроля в субъектах Российской Федерации. URL: <https://aviales.ru/default.aspx?textpage=229> (дата обращения: 15.03.2024).
9. *Берг Л. С.* Географические зоны Советского Союза, изд. 3. М.: Географгиз, 1947. Т. 1. 397 с.; М.: Географгиз, 1952. Т. 2. 511 с.
10. *Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И.* Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы: монография / под общей редакцией Ю. Л. Воробьева. М.: «Дэкс-Пресс», 2004. 312 с. EDN: UCSYVJ
11. *Козлов В. И., Муллаяров В. А.* Грозовая активность в Якутии: монография. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. 103 с. EDN: QKESHP
12. *Филиппов А. Х.* Грозы Восточной Сибири. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 75 с.
13. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства: официальный сайт. URL: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml (дата обращения: 15.03.2024).
14. *Ермаков В. И., Стожков Ю. И.* Физика грозových облаков: монография. М.: Препринт ФИАН РФ, 38 с. EDN: QKENLL
15. *Иванов В. А.* Грозы и лесные пожары // Лесные пожары и их последствия. Красноярск: ИЛ и ДСОАН СССР, 1985. С. 38–46.
16. *Иньков В. К., Махоткин Л. Г.* Широтные особенности грозовой деятельности // Труды ГГО. Атмосферное электричество. 1981. Вып. 442. С. 34–38.
17. Грозы в Якутии и их влияние на магистральные трубопроводы / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, А. Е. Васильев и др. // Наука и образование. 2005. № 1. С. 61–66. EDN: KATNZR
18. *Козлов В. И., Муллаяров В. А.* Инструментальные наблюдения грозовой активности в Якутии в 1993–1994 гг. // Метеорология и гидрология. 1996. № 2. С. 105–109.
19. *Козлов В. И., Муллаяров В. А., Соловьев В. С.* Лесные пожары в Якутии от гроз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6, № 2. С. 388–393. EDN: NDPYFT
20. *Козлов В. И., Муллаяров В. А., Каримов Р. Р.* Пространственное распределение плотности грозových разрядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 257–262. EDN: OGAPBX
21. *Тарасов Л. В.* Ветры и грозы в атмосфере Земли. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 277 с. EDN: QKKHNX
22. *Шахаева Е. В.* Конвективные явления на территории Иркутской области в 2000–2013 гг // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2015. Т. 12. С. 136–152. EDN: TJANYZ
23. *Коровин Г. Н., Зукерт Н. В.* Влияние климатических изменений на лесные пожары в России // Климатические изменения: взгляд из России / под ред. В. И. Данилова-Данильяна. М.: ТЕИС, 2003. С. 69–98. URL: <http://www.priroda.ru/lib/detail.php?ID=5082> (дата обращения: 15.03.2024).
24. К оценке изменений пожароопасной обстановки в лесах России при ожидаемом потеплении климата в XXI веке / С. П. Малевский-Малевич, Е. К. Молькентин, Е. Д. Надежина и др. // Метеорология и гидрология. 2005. № 3. С. 36–44. EDN: KUNKWF
25. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/lncs> (дата обращения: 15.03.2024)
26. *Столярчук Л. В., Камышианова В. А.* Условия возникновения массовых лесных пожаров от гроз // Труды ГГО. Атмосферное электричество. 1984. Вып. 474. С. 120–126.
27. *Столярчук Л. В., Камышианова В. А.* Повторяемость лесных пожаров и их связь с фор-

мами атмосферной циркуляции // Труды ГГО. Атмосферное электричество. 1984. Вып. 474. С. 126–129.

28. Анисимов О. А., Жильцова Е. Л. Об оценках изменений климата регионов России в XX в. и начале XXI в. по данным наблюдений // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 95–107. EDN: OYSLAR

29. Васильев И. С., Торговкин Я. И. Пространственное распределение осадков в Якутии // Метеорология и гидрология. 2002. № 6. С. 23–32. EDN: SBOGNR

30. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: В 3-х томах / Г. В. Алексеев, М. Д. Ананичева, О. А. Анисимов

и др. Том 1–3. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с. EDN: UKLXXH

31. Банк данных об изменениях метеоусловий в различных регионах мира. URL: <https://en.tutiempo.net/climate> (дата обращения: 15.03.2024).

32. Национальный атлас России. В 4 томах. Том 2. Природа и экология / под ред. В. М. Котлякова. М.: ПКО «Картография», 2007. 495 с.

33. Григорьев А. А. Закономерности строения и развития географической среды: Избранные георетические работы. М.: Мысль, 1966. 384 с.

34. Атмосферные блокингиды над Сибирью и лесные пожары на её территории в 2012–2020 гг. / А. В. Холопцев, И. Ю. Сергеев, А. Н. Батура и др. // Техносферная безопасность. 2022. № 4 (37). С. 3–17. EDN: JWNSCW

Статья поступила в редакцию 22.03.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 05.06.2024

Информация об авторе

ХОЛОПЦЕВ Александр Вадимович – доктор географических наук, профессор кафедры контрольно-надзорной деятельности, Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. Область научных интересов – лесное хозяйство, экология, климатология, безопасность при чрезвычайных ситуациях. Автор более 207 научных публикаций. SPIN-код: 2419-5410

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Scientific article
UDC 502.313
<https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.82>
EDN: CXOYBY

Changes in the Recurrence of Dry Thunderstorms under Modern Climate Warming on the Example of Some Regions of Yakutia and Krasnoyarsk Krai

A. V. Kholoptsev

Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia,
1, Severnaya St., Zheleznogorsk, 662972, Russian Federation
knd@sibpsa.ru

Abstract. *Introduction.* The distinguishing characteristic of dry thunderstorms is the absence of precipitation accompanying these weather events, which contributes to the intensity and spread of wildfires induced by lightning strikes igniting combustible materials. In forested but unpopulated areas, dry thunderstorms are the main cause of fires. It is generally accepted that their recurrence increases with increasing aridity of the local climate. However, the features of changes in dry thunderstorm frequency in certain forest-rich regions of Russia under modern climate warming have not been sufficiently studied yet. Therefore, identification of these changes for regions located in Siberia is a topical issue of ecology and safety in emergency situations. *The aim* of the work was to identify the trend in interannual variations in the recurrence of dry thunderstorm events during summer months and overall thunderstorm seasons for the period of 1961–2023 with regard to Yakutia and Krasnoyarsk Krai. *Objects and methods of research.* The objects of the study were changes in dry thunderstorm frequency and mean monthly air temperatures in the surface layer of the atmosphere assessed during the months of the 1961–2023 thunderstorm seasons. The study was carried out using the correlation analysis method and Student's test. *Results.* It was found that the trends of interannual changes in the recurrence of dry thunderstorms are determined not only by the local climate variations, but also by the geographical location of the studied areas. For the sites located on the Prilensky Plateau and in the basins of the Lena and Yana Rivers, during any of the summer months within the period under study, the climatic norms of dry thunderstorm recurrence increased much faster than those of recurrence of all thunderstorm events. This peculiarity was not observed in the areas located on the Oymyakonsky Plateau and the Middle Siberian Plateau. *Conclusion.* The study showed that the synchronous correlation of variations in the recurrence of dry thunderstorms and the thermic regime of the territory is not significant for all locations, which indicates the presence of substantial influence of other factors, presumably landscape ones.

Keywords: dry thunderstorm; forest fire; recurrence; emergency situation; the Republic of Sakha (Yakutia); the Krasnoyarsk Krai; trend; synchronous communication

Funding: this study was not supported by any external sources of funding.

For citation: Kholoptsev A. V. Changes in the Recurrence of Dry Thunderstorms under Modern Climate Warming on the Example of Some Regions of Yakutia and Krasnoyarsk Krai. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2024;(2):82–97. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2024.2.82>; EDN: CXOYBY

REFERENCES

- Dmitriev A. N., Krechetova S. Yu., Kocheeva N. A. Thunderstorms and forest fires from thunderstorms on the territory of the Altai Republic. Monograph. Gorno-Altai: GASU Publ.; 2011. 154 p. EDN: QKKRQF (In Russ.).
- Ivanov V. A., Korshunov N. A., Matveev P. M. Lightning-induced fires in the forests of the Krasnoyarsk Angara Region. Monograph. Krasnoyarsk: SibSTU Publ.; 2004. 132 p. EDN: QKWXMB (In Russ.).
- Kurbatsky N. P. On the mechanism of forest fire generation by lightning. *Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie)*. 1976;(3):95–98. (In Russ.).
- Paramonov E. G., Ishutin Ya. N. Large Forest fires in the Altai Territory. Monograph. 2nd ed., revised and enlarged. Barnaul: Altai State University; 2005. 240 p. EDN: YPSALB (In Russ.).
- Stebaev I. V., Pivovarova J. F., Smolyakov B. S. et al. Biogeosystems of the forests and waters of Russia. Monograph. Novosibirsk: Novosibirsk Branch of the Publishing House "Nauka"; 1993. 348 p. EDN: XUCRSH (In Russ.).
- Strakhov V. V., Pisarenko A. I., Borisov V. A. Forests of the world and Russia. *Use and Protection of Natural Resources of Russia*. 2001;(9):49–63. (In Russ.).
- The Siberian World. 1st ed. Ziker J. P., Ferguson J., Davydov V. (eds.). Abingdon, UK and New York, USA: Routledge; 2023. 654 p. DOI: 10.4324/9780429354663
- Location maps of Control Zones in the regions of the Russian Federation. Available from: <https://aviales.ru/default.aspx?textpage=229> [Accessed 15 March 2024]. (In Russ.).
- Berg L. S. Geographical zones of the Soviet Union. 3rd ed. Moscow: Ogiz-Geografiz; Vol. 1. 1947. 397 p.; Vol. 2. 1952. 511 p. (In Russ.).
- Vorobyov Yu. L., Akimov V. A., Sokolov Yu. I. Forest fires in Russia: state and problems. Monograph. Vorobyov Yu. L. (gen. ed.). Moscow: Dex-Press; 2004. 312 p. EDN: UCSYVJ (In Russ.).
- Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Kozlov V. I. et al. Thunderstorm activity in Yakutia. Monograph. Yakutsk: The Yakut Branch of the Publishing House of SB RAS; 2004. 103 p. EDN: QKECHP (In Russ.).
- Filippov A. H. Thunderstorms of Eastern Siberia. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1974. 76 p. (In Russ.).
- Information system of remote monitoring of the Federal Forestry Agency. Fire danger monitoring unit. Available from: https://pushkino.aviales.ru/main_pages/index.shtml [Accessed 15 March 2024]. (In Russ.).
- Ermakov V. I., Stozhkov Yu. I. Physics of thunderclouds. Monograph. Moscow: Preprint LPI RAS; 2004. 38 p. EDN: QKEHLL (In Russ.).
- Ivanov V. A. Thunderstorms and forest fires. In: *Forest fires and their consequences: collection of papers*. Kurbatsky N. P. (ed.). Krasnoyarsk: The Institute of Forest and Wood SB USSR Academy of Sciences; 1985:38–46. (In Russ.).
- Inkov V. K., Makhotkin L. G. Latitudinal features of thunderstorm activity. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory. Atmospheric Electricity*. 1981;(442):34–38. (In Russ.).
- Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Vasiliev A. E. et al. Thunderstorms in Yakutia and their influence on main pipelines. *Science and Education*. 2005;(1):61–66. EDN: KATNZR (In Russ.).
- Kozlov V. I., Mullayarov V. A. Instrumental observations of thunderstorm activity in Yakutia in 1993–1994. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 1996;(2):105–109. (In Russ.).
- Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Solovyov V. S. Forest fires in Yakutia from thunderstorms. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2009;6(2):388–393. EDN: NDPYFT (In Russ.).
- Kozlov V. I., Mullayarov V. A., Karimov R. R. The spatial distribution of the lightning in the east of Russia on remote sensing data. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2011;8(3):257–262. EDN: OGAPBX (In Russ.).
- Tarasov L. V. Winds and thunderstorms in the Earth's atmosphere. Dolgoprudny: Intellect Publ.; 2011. 277 p. EDN: QKKHNX (In Russ.).
- Shakhaeva E. V. Convective phenomena on the territory of Irkutsk Region in 2000–2013. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series "Earth Sciences"*. 2015;12:136–152. EDN TJAHYZ (In Russ.).
- Korovin G. N., Zukert N. V. The impact of climate change on forest fires in Russia. In: *Climate change: a view from Russia*. Danilov-Danilyan V. I. (ed.). Moscow: TEIS, 2003:69–98. EDN: QKDXUR (In Russ.).
- Malevsky-Malevich S. P., Molkentin E. K., Nadyozhina E. D. et al. On the assessment of changes in the fire-hazardous situation in the forests of Russia with the expected climate warming in the XXI century. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2005;(3):36–44. EDN: KUHKWF (In Russ.).
- Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Available from: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/lncs> [Accessed 15 March 2024].

26. Stolyarchuk L. V., Kamyshanova V. A. Conditions of occurrence of massive forest fires from thunderstorms. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory. Atmospheric Electricity*. 1984;(474):120–126. (In Russ.).

27. Stolyarchuk L. V., Kamyshanova V. A. The recurrence of forest fires and their connection with forms of atmospheric circulation. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory. Atmospheric Electricity*. 1984;(474):126–129. (In Russ.).

28. Anisimov O. A., Zhil'tsova E. L. Climate change estimates for the regions of Russia in the 20th century and in the beginning of the 21st century based on the observational data. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2012;37(6):421–429. DOI: 10.3103/S1068373912060106. EDN: RGDAQH (In Russ.).

29. Vasiliev I. S., Torgovkin Ya. I. Spatial distribution of precipitation in Yakutia. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2002;(6):23–32. EDN: SBOG NR (In Russ.).

30. Alekseev G. V., Ananicheva M. D., Anisimov O. A. et al. Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. In 3 volumes. Vol. 1. Moscow: Roshydromet, 2014. 1009 p. EDN: ZEPEGI (In Russ.).

31. Global climate data. Available from: <https://en.tutiempo.net/climate> [Accessed 15 March 2024].

32. The National atlas of Russia. Kotlyakov V. M. (ed.). In 4 volumes. Vol. 2: *Nature. Ecology*. Moscow: Roskartografiya; 2007. 495 p. (In Russ.).

33. Grigoriev A. A. The regularities of structure and development of the geographical environment. *Selected theoretical works*. Moscow: Mysl'; 1966. 382 p. (In Russ.).

34. Kholoptsev A. V., Sergeev I. Y., Baturo A. N. et al. Atmospheric blockings over Siberia and forest fires on its territory at 2012–2020 yrs. *Technosphere Safety*. 2022;(4(37)):3–17. EDN: JWN SCW (In Russ.).

The article was submitted 22.03.2024; approved after reviewing 05.06.2024; accepted for publication 05.06.2024

Information about the author

Alexander V. Kholoptsev – Doctor of Geographical Sciences, Professor of the Department of Control and Supervisory Activities, Siberian Fire and Rescue Academy of EMERCOM of Russia. Research interests – forestry, ecology, climatology, safety in emergency situations. Author of more than 207 scientific publications. SPIN: 2419-5410

Conflict of interests: the author declare no conflict of interest.
Author read and approved the final manuscript.

ДАТЫ. СОБЫТИЯ. КОММЕНТАРИИ DATES. EVENTS. COMMENTS

Персоналии
УДК 630.232

К 95-летию выдающегося учёного лесной науки и педагога Виктора Ильича Пчелина

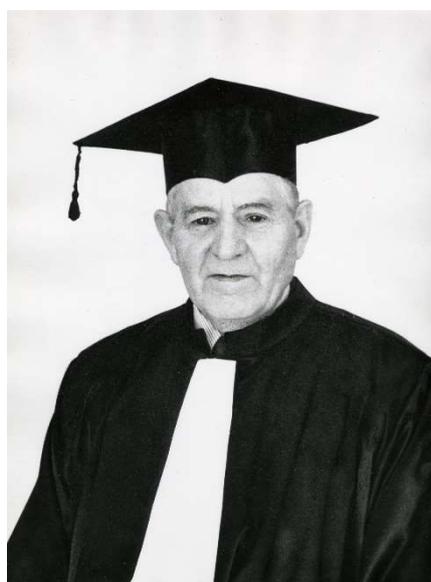
Н. Е. Серебрякова[✉], Л. А. Тимурғалиева

Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3
SerebryakovaNE@volgatech.net[✉]

29 июня 2024 года исполнилось 95 лет Пчелину Виктору Ильичу – доктору сельскохозяйственных наук, Заслуженному лесоводу России, Почётному работнику высшего профессионального образования Российской Федерации, Заслуженному деятелю науки Республики Марий Эл, Ветерану труда, Почётному профессору ПГТУ.

Профессионал своего дела, талантливый, увлечённый исследователь природы, мудрый руководитель и педагог, чуткий неравнодушный человек – пример для учеников и коллег! Жизненный путь этого великого учёного по-прежнему вдохновляет на новые исследования и открытия всех, кто стремится к знаниям, мудрости и глубокому пониманию природы. Его труды и наставления до сих пор живут в умах и сердцах последователей и приверженцев его идей, являются опорой для дальнейшего научного поиска.

Виктор Ильич родился в селе Починки Починковского района Горьковской области в семье рабочего типографии и домохозяйки. С 1948 года его жизнь неразрывно связана с Поволжским лесотехническим институтом (ПЛТИ) и лесной отрас-



лю. Уже во время учёбы на лесохозяйственном факультете способности талантливого студента нашли своё выражение в отличной учёбе и результативной научной работе с 1953 года в аспирантуре под руководством профессора Михаила Даниловича Данилова.

С этих пор исследования древесных видов и лесных насаждений – неизменная часть жизни и деятельности Виктора Ильича. Основная направленность научной работы заключена в оценке биологического разнообразия лесных экосистем с целью обоснования повышения устойчивости, продуктивности и природоохранной роли лесов Среднего Поволжья [1–3].

Кандидатская диссертационная работа Виктора Ильича Пчелина, успешно защищённая в 1961 году, посвящена лесоводственным особенностям и физико-механическим свойствам древесины красношишечной и зелёношишечной форм ели в условиях Марийской АССР. Далее в область научных интересов вошла и «нянька ели» – осина. Задача реабилитировать этот неоднозначный вид в глазах лесоводов оказалась под силу Виктору Ильичу: на основе многолетних наблюдений доказана возможность выращивания

осины без сердцевинной гнили от осинового трутовика.

Продолжалось изучение основных лесообразователей, их внутривидового разнообразия: экспедиции, закладка сети пробных площадей по всему Волго-Камскому району, научные опыты, анализ данных. Плантационные культуры ели, заложенные под руководством В. И. Пчелина совместно с Санкт-Петербургским НИИЛХ на Пектубаевском лесном участке в эти годы, являлись уникальным для Европейской части России стационарным опытным объектом [4].

В январе 1990 года, по результатам 35-летней работы, фундаментальный труд «Биологические основы выращивания высококачественной древесины целевого назначения (на примере ельников и осинников Среднего Поволжья)» [5] получил признание на Учёном совете Ленинградской лесотехнической академии (ЛТА) и Виктор Ильич Пчелин был удостоен учёной степени «доктор сельскохозяйственных наук», а в 1992 году ему присвоено учёное звание профессора.

Виктор Ильич Пчелин как научный руководитель, так и в составе команды участвовал в выполнении крупных проблемных исследований по заданиям Государственного комитета по науке и технике и Госкомлеса, Министерства высшего и среднего специального образования, Министерства лесного хозяйства РСФСР, затем Рослесхоза, Правительства Республики Марий Эл [6, 7]. В рамках работы «Лесоводственно-селекционные основы восстановления и повышения продуктивности ельников Волго-Вятского района», выполненной под руководством В. И. Пчелина, даны ценные практические рекомендации по решению актуальной проблемы нежелательной смены пород [8].

С участием В. И. Пчелина разрабатывались региональные биоэкологические основы ускоренного выращивания промышленных насаждений целевого назначения [9], направленные на решение проблемы дефицита обеспечения древесиной лесного комплекса в Европейско-

Уральской зоне. В 1989–2005 годах участвовал в Общесоюзной программе фундаментальных исследований «Проблемы лесоведения», возглавлял группу по изучению длительного производственного и научного опыта выращивания плантационных культур разных видов и гибридов тополя в условиях Среднего Поволжья [10, 11].

Огромный спектр важных лесоводственных вопросов был решён в процессе научных исследований Виктора Ильича: даны рекомендации в отношении выбора лесных пород, формирования оптимальной видовой и формовой структуры естественных и искусственных насаждений в ельниках и осинниках, определены наиболее рациональные режимы выращивания древостоев в связи с показателями качества древесины [12–17]. Виктор Ильич являлся руководителем темы «Научно-методические основы восстановления парка и зимнего сада замка Шереметевых в п. Юрино», которая характеризует этап увлечённости проблемами экологии, озеленения и ландшафтной архитектуры [18–20].

Другим важным аспектом деятельности Виктора Ильича Пчелина являлась педагогическая работа, за 50-летний период им пройден путь от ассистента (1956–1963 гг.) до профессора (1991–2008 гг.) Поволжского государственного технологического университета (ПГТУ) (ранее Поволжский лесотехнический институт (ПЛТИ), затем Марийский политехнический институт, Марийский государственный технический университет). Ведущий преподаватель дисциплин «Лесоведение», «Дендрология», «Дендрофлора и леса мира», «Древоводство», руководитель аспирантуры, член диссертационного Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций и Учитель с большой буквы!

Знарок леса, его живыми рассказами заслушиваются коллеги и студенты. Он охотно делится своими впечатлениями от поездок по регионам России в период изучения флоры различных лесорастительных зон, о видовом разнообразии и отдельных видах деревьев и кустарни-

ков, о том, как и в каких условиях собирал коллекции шишек, семян, древесины в разных уголках страны. Никогда его лекции не были сухим изложением фактов, в них всегда присутствовала эмоциональная окраска, любовь к природе, богатые знания и личный исследовательский опыт. Он относится к тому удивительному поколению педагогов и учёных с высочайшей эрудицией в различных областях, способных органично вплетать в своё повествование стихи и цитаты, легко оперировать различными данными. Нельзя не отметить и его уникальную манеру изложения и построения диалога, в основе которой – чуткость к собеседнику, юмор и красочность.

Своей страстью к познанию и увлечённостью миром природы Виктор Ильич Пчелин увлёк многих. Целый пласт выдающихся выпускников – специалистов лесного профиля, учёных и руководителей разного уровня восхищённо вспоминают общение с учителем и благодарят за бесценный опыт. Виктор Ильич никогда не допускал поверхностного отношения к науке и образованию. Тщательнейшая проработка данных и огромное внимание ко всем деталям – требование к себе и посыл ученикам. Дар педагога, личная харизма, умение заинтересовать творческим поиском, деликатно и доходчиво направить к решению проблемы – вклад Виктора Ильича в становление профессионалов.

Руководящая административная работа также в арсенале В. И. Пчелина: более 12 лет – декан заочного и лесохозяйственного факультетов, с мая по ноябрь 1968 года – проректор по научной работе, в период 1980–1985 гг. – заведующий кафедрой лесоводства и дендрологии, в период 1991–1999 гг. – заведующий кафедрой ботаники, дендрологии и садово-паркового строительства (с 1997 года кафедра обрела современное название – садово-паркового строительства, ботаники и дендрологии).

Виктор Ильич Пчелин стоял у истоков идеи подготовки на базе вуза инженеров-озеленителей. После открытия специаль-

ности 260500 «Садово-парковое строительство», в числе первых в стране возглавил данное направление. Высокий уровень образовательной деятельности кафедры, формирование сплочённого коллектива, связей с производством, увлечённость сотрудников общим делом, научная и проектная работа кафедры – заслуга Виктора Ильича как мудрого руководителя. Именно под его началом кафедра пополнилась аспирантами и молодыми преподавателями, стала формироваться научная школа и выделились актуальные направления развития. Результативность руководящей работы и уважение коллектива – показатели, которые достигал В. И. Пчелин благодаря своей экспертности, авторитету и внимательному отношению к людям.

Особая веха с 1976 по 1983 гг. в жизни В. И. Пчелина – научное руководство дендрологическим садом МарПИ (в настоящее время Ботанический сад-институт ПГТУ). За этот период коллективом кафедры и дендрологического сада под руководством Виктора Ильича разработаны: генеральная схема функционального зонирования его территории, проекты коллекционного дендрологического отдела, популетума, фрутицетума, сирингария и других экспозиций. Кроме того, совершенствовалась методика наблюдений и научных отчётов, интенсивно пополнялись коллекции, многие растения нашли применение в озеленении города Йошкар-Олы и других населённых пунктов.

Взаимодействие с Ботаническим садом Виктор Ильич Пчелин не прекращал никогда, понимая его важнейшую роль в формировании специалистов лесного профиля и, особенно, садово-паркового строительства. Молодые специалисты, окончившие лесотехнический институт, могли быть направлены по распределению в любую точку нашей необъятной Родины, и каждый из них был обязан знать лесообразующие породы страны, невзирая на климат или разницу во флоре различных географических регионов.

Осознавая эту ответственность при подготовке квалифицированных кадров

для развития лесной отрасли нашей страны, учёный почти 50 лет участвовал в создании живых коллекций, способствовал организации практических занятий и научной работы на базе Ботанического сада.

Также значительное внимание Виктор Ильич уделял интродуцентам не только с точки зрения образовательного процесса, но и с целью поиска хозяйственно ценных таксонов для нужд лесного хозяйства и для озеленения населённых пунктов. За время научного руководства дендрологическим садом удалось сформировать значительную коллекцию экзотов, многие из которых проходили длительную адаптацию и акклиматизацию к погодным факторам Среднего Поволжья, прошли основные этапы интродукции и теперь успешно выращиваются и в условиях Республики Марий Эл, и в соседних регионах. В составе фитоценологического отдела БСИ ПГТУ Виктор Ильич выделил ценные формы аборигенных видов по биоморфологическим свойствам.

Для многих работников современного Ботанического сада-института Виктор Ильич также является учителем. Его наставления до сих пор помнят его ученики и отмечают ту любовь, с которой он всегда рассказывал о каждом дереве и кустарнике, растущем в Дендрарии. Казалось, что именно этот таксон, про который он говорит сейчас, является его любимым объектом в экспозиции. Но начиналась новая лекция, новый урок, и следующий представитель мира флоры вновь преподносился всё с тем же вдохновением и восхищением, с которым Виктор Ильич говорил о других деревьях ещё вчера. Благодаря такому подходу и любви к своему делу, его последователям удалось сформировать такое же бережное отношение и любовь к каждому элементу живой природы, сохранить и пронести этот огонь преданности своей профессии.

Виктор Ильич входил в состав координационного Совета по современным проблемам древесиноведения при Международной академии древесиноведения в МГУЛ, Экспертного экологического со-

вета Минэкологии Республики Марий Эл. Являлся членом президиума и председателем научно-технического Совета Марийского республиканского общества охраны природы и председателем секции лесного хозяйства НТО.

Огромный исследовательский опыт, высочайший профессионализм и несколько лет скрупулёзной работы позволили В. И. Пчелину в 2007 году издать уникальный учебник «Дендрология» [21], предназначенный для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Лесное хозяйство и ландшафтное строительство» и другим родственным специальностям. Учебник «Дендрология» допущен УМО по образованию в области лесного дела и является одним из лучших и востребованных по данной дисциплине. Материал по 500 древесным таксонам тщательно выверен автором, талантливо скомпонован и проиллюстрирован. Это издание, как и интересные рассказы Виктора Ильича, погружает в мир древесных растений, наполненный цифрами и фактами, и, благодаря мастерству изложения, объёмный учебный материал воспринимается легко и заинтересовывает обучающегося. Учебник «Дендрология» В. И. Пчелина – выдающийся труд, которым гордится университет.

Виктор Ильич – автор более 150 научных и методических работ.

Подтверждением больших достижений В. И. Пчелина являются награды: медаль «За доблестный труд. В ознаменование 100-летия со дня рождения Владимира Ильича Ленина», медали «50 лет Победы в Великой Отечественной войне (1941–1945 гг.)» и «60 лет Победы в Великой Отечественной войне (1941–1945 гг.)», Почётная грамота Президиума Верховного Совета Марийской АССР (1979 г.), медаль «Ветеран труда», Почётная грамота Правительства МАССР за борьбу с лесными пожарами (1972 г.), почётные грамоты от общественных организаций за научную работу и педагогический труд, значок «За сбережение и приумножение лесных богатств РСФСР», знак

«За охрану природы России» (1975 г.), Почётная грамота Министерства культуры, печати и по делам национальностей Республики Мари Эл «За многолетнюю работу в активе Марийского республиканского отделения Всероссийского общества охраны памятников истории и культуры и в связи с 40-летием общества».

Искренне поздравляем Виктора Ильича с достойным юбилеем! Желаем ему крепкого здоровья и долголетия, пусть каждый день будет преисполнен радостью

и удовлетворением от проделанной работы, а внутренний огонь оптимизма и живой энергии не иссякает никогда. Для нас Виктор Ильич – олицетворение мудрости и энтузиазма, его пример является напутствием и наставлением для всех тех, кто продолжает начатое им дело. Его знания, идеи и взгляды интегрировались в дальнейшую работу последователей, и сегодня мы с гордостью можем сказать, что дело Пчелина Виктора Ильича живет!

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пчелин В. И., Данилов М. Д. Формовое разнообразие осины в лесах Среднего Поволжья // Сб. тр. ПЛТИ им. М. Горького. 1967. № 58, вып. 3. С. 210–213.
2. Пчелин В. И. К вопросу лесоводственной оценки ели в аутохтонных популяциях Среднего Поволжья // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. Л.: Лесотехническая академия. 1989. С. 82–85.
3. Пчелин В. И. Внутрипопуляционное биоразнообразие ельников Среднего Поволжья // Экология и генетика популяций: сборник материалов Всероссийского популяционного семинара, Йошкар-Ола, 5–9 февраля 1997. Йошкар-Ола: Периодика, 1998. с. 151–153.
4. Пчелин В. И. Строение, плотность и прочность древесины ели в связи с типами леса // Доклады ТСХА. 1997. № 5. С. 112–114.
5. Пчелин В. И. Ельники и осинники Среднего Поволжья (природные особенности, биоразнообразие и рост древостоев). Йошкар-Ола: МарГТУ, 2000. 222 с. Деп. в ВИНТИ 05.05.00, N 1285-V00.
6. Серебрякова Н. Е., Пчелин В. И. Полиморфизм сосны веймутовой в культурах Среднего Поволжья // Современные проблемы теории и практики лесного хозяйства: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения д-ра биол. наук, проф. М. Д. Данилова, Йошкар-Ола, 29–31 октября 2008. Йошкар-Ола: МарГТУ. 2008. С. 180–183.
7. Пчелин В. И. Хозяйство в осинниках Среднего Поволжья // Лесное хозяйство. 1987. № 3. С. 72–75.
8. Пчелин В. И., Сабанцева Ю. П. Характеристика роста тополя бальзамического в лесостепных условиях Нижегородской области // Рациональное использование лесных ресурсов: материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 80-летию со дня рождения Ю. Я. Дмитриева, Йошкар-Ола, 20–22 апреля 1999. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1999. С. 19–20.
9. Распространение и характеристика внутренней заболони древесины дуба черешчатого в Среднем Поволжье / В. И. Пчелин, И. А. Алексеев, А. Х. Газизуллин, А. С. Яковлев // Экологический вестник Чувашии. 1996. Вып. 13. С. 101–103.
10. Пчелин В. И. Влияние типов лесорастительных условий на качество древесины сосны обыкновенной в Среднем Поволжье // Известия вузов. Лесной журнал. 2003. № 1. С. 12–13.
11. Пчелин В. И., Ефремова Л. П., Крейер В. А. К истории формирования коллекции оранжевых растений в усадьбе Шереметьевых в п. Юрино // Экология и генетика популяций: сборник материалов Всероссийского популяционного семинара, Йошкар-Ола, 5–9 февраля 1997. Йошкар-Ола: Периодика, 1998. С. 227–229.
12. Пчелин В. И., Патрикеев Е. И., Сазонова Ю. Р. К характеристике Пектубаевского стационарного опытного участка культур ели // Материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, докторантов, аспирантов, сотрудников МарГТУ, посвящённой Дню университета и 65-летию вуза, Йошкар-Ола, 27–31 мая 1997. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1997. Вып. 5, Ч. 4. С. 84–86.
13. Пчелин В. И., Котов М. М., Патрикеев Е. И. Оптимизация состава, строения и возрастной структуры лесов // Комплексная целевая программа «Марийский лес». Йошкар-Ола: МарПИ, 1985. С. 298–306.
14. Пчелин В. И., Газизуллин А. Х. Почвенно-экологические условия произрастания высокопроизводительных культур сосны и ели в лесостепи Среднего Поволжья // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение. Повышение продуктивности лесов в Европейской части СССР. Л.: Лесотехническая академия, 1986. С. 26–30.
15. Пчелин В. И. Опыт селекционной оценки и создания лесосеменных плантаций ели в Волго-Вятском районе // Внедрение достижений науки и передового опыта в опытно-показательных предприятиях Минлесхоза РСФСР (Экспресс-информация). ЦБНТИлесхоз СССР. М.; 1982. Вып. 9. С. 8–11.
16. Пчелин В. И. Выращивание высококачественной древесины целевого назначения. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. 265 с. Деп. в ВИНТИ.

17. Пчелин В. И., Лебедева Э. П. Плотность древесины тополей // Современные проблемы древесиноведения: тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции, Воронеж, 22–24 сентября 1981 г. Воронеж: Воронежская лесотехническая академия, 1981. С. 145–148.

18. К вопросу формирования насаждений парка Шереметьевых в п. Юрино / В. И. Пчелин, Л. Н. Крылова, К. К. Калинин, Н. А. Соколова // Современные проблемы учёта и рационального использования лесных ресурсов: материалы региональной научно-практической конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения д-ра с.-х.

наук, проф. Максима Лавровича Дворецкого, Йошкар-Ола, 27 января 1998. Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. С. 73–74.

19. Пчелин В. И., Соколова Н. А. Дендрология. Дендрофлора и леса мира: учеб. пособие для студ. спец. «Лесное и лесопарковое хозяйство», «Садово-парковое и ландшафтное строительство». Йошкар-Ола: МарГТУ, 1997. 71 с.

20. Древодводство: учеб. пособие / А. В. Алексеев, В. И. Пчелин, Л. Н. Крылова, Н. А. Соколова. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. 156 с.

21. Пчелин В. И. Дендрология: учебник. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. 372 с.

Информация об авторах

СЕРЕБРЯКОВА Наталья Евгеньевна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры садово-паркового строительства, ботаники и дендрологии, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – интродукция древесных растений, озеленение населённых пунктов. Автор 100 научных и учебно-методических работ.

ТИМУРГАЛИЕВА Лариса Алексеевна – начальник отдела учебной и научной работ Ботанического сада-института, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – экологическое образование и просвещение. Автор 15 научных и учебно-методических работ.

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>

Подписка на журнал осуществляется по интернет-каталогу «Пресса России» (подписной индекс 42920, тематический указатель Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов»).