

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

2

2024

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

DOI: 10.37482/0536-1036

ISSN 0536-1036

Lesnoy Zhurnal

(Russian Forestry Journal)

Scientific peer-reviewed journal

Established in 1833

Issued as part of the

“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958

Published bi-monthly

2

2024

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

EDITORIAL BOARD:

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

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

ЮБИЛЕЙ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА – ВЛАДИМИРА ИВАНОВИЧА МЕЛЕХОВА



1 апреля 2024 г. исполняется 85 лет со дня рождения Владимира Ивановича Мелехова, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры лесопромышленных производств и обработки материалов Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова (САФУ), заслуженного деятеля науки РФ, почетного работника сферы образования РФ, действительного члена РАЕН и Академии проблем качества РФ, члена координационного совета по современным проблемам древесиноведения Международной академии древесины, председателя Северного регионального отделения наук о лесе РАЕН.

В 1961 г. Владимир Иванович окончил Архангельский ордена Трудового Красного Знамени лесотехнический институт им. В.В. Куйбышева (сейчас – САФУ) по специальности «Механическая технология древесины» с присвоением квалификации инженера-механика по машинам и оборудованию деревообработки.

Свою трудовую деятельность выдающийся ученый В.И. Мелехов начал в 1961 г. в Центральном научно-исследовательском институте механической обработки древесины, пройдя путь от инженера до старшего научного сотрудника. В этот период обучался в аспирантуре и в 1969 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Исследование точности работы механизма подачи обрезающего станка».

С 1969 г. Владимир Иванович работал в Архангельском лесотехническом институте им. В.В. Куйбышева заведующим кафедрой древесиноведения. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Ресурсосберегающие технологические процессы обработки древесины». С 2014 г. – профессор кафедры лесопромышленных производств и обработки материалов САФУ.

В.И. Мелехов создал новое научное направление по исследованию свойств механически деструктурированной до волокнистообразного состояния цельной древесины. Разработал ресурсосберегающие технологии использования низкокачественной древесины и отходов деревообрабатывающих производств в качестве полноценного сырья для получения экологически чистой продукции. Он стоит у истоков инновационного направления по совершенствованию конструкций и созданию лесосушильных камер и энергоэффективного теплового оборудования на основе биметаллических оребренных поверхностей. Разработал принципиально новую концепцию проектирования и подготовки дереворежущего инструмента с повышенными эксплуатационными характеристиками. Впервые предложил и обосновал направление подготовки круглых, ленточных и полосовых пил.

Технические решения, защищенные патентами, применены в конструкциях сушильных камер ЛС-2, УЛ-2, фрезерного инструмента на деревообрабатывающих предприятиях России. Рекомендации по подготовке круглых пил использованы на заводе-изготовителе пил Нижнего Новгорода.

На должности главного редактора научного рецензируемого журнала «Известия вузов. Лесной журнал» Владимир Иванович проводит активную работу по укреплению позиций этого издания в научном мировом сообществе. В 2018 г. при непосредственном участии В.И. Мелехова «Лесной журнал» вошел в базу данных Russian Science Citation Index на платформе Web of Science и международную базу данных Web of Science Core Collection.

Владимир Иванович является автором более 500 научных работ, в т. ч. 110 патентов на изобретение, 1 учебника, 9 монографий в области древесиноведения и переработки древесины, использования малоценной древесины и отходов деревообработки на основе новых технологий.

Владимир Иванович – председатель диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций (технические науки). Как научный руководитель аспирантов и докторантов подготовил 30 кандидатов и 7 докторов наук.

Заслуженный профессор САФУ Мелехов Владимир Иванович награжден серебряной медалью ВДНХ, знаком «Изобретатель СССР», почетной серебряной медалью В.И. Вернадского, почетным знаком РАЕН «За заслуги в развитии науки и экономики России», является победителем конкурса «Профессор года – 2019» в номинации «Лучший наставник». В 2021 г. Владимир Иванович удостоен престижной региональной общественной награды «Достояние Севера».

Коллеги, аспиранты, докторанты и выпускники поздравляют Владимира Ивановича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья, благополучия и новых творческих успехов! Ваша жизнь – вдохновение для всех нас! Ваши мудрость и доброта делают этот мир лучше!

К ЮБИЛЕЮ ПРОФЕССОРА АНАТОЛИЯ ПЕТРОВИЧА ЦАРЕВА

5 марта 2024 г. исполняется 85 лет со дня рождения Анатолия Петровича Царева, доктора сельскохозяйственных наук, профессора, заслуженного лесовода Карелии и России.

А.П. Царев родился в 1939 г. в Днепропетровской области. В 1957 г. окончил Велико-Анадольский лесной техникум, а в 1962 г. – Воронежский лесотехнический институт (ВЛТИ, сегодня – ВГЛУ) и был направлен в Омскую область для работы лесничим.

С 1964 по 1967 гг. обучался в аспирантуре ВЛТИ. В 1968 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Лесоводство». С 1968 г. был старшим научным сотрудником Астраханской лесной опытной станции Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, с 1971 по 1995 гг. – Центрального научно-исследовательского института лесной генетики и

селекции (ЦНИИЛГиС), затем заведовал лабораторией селекции, потом – отделом лесной интродукции и исполнял обязанности заместителя директора по научной работе ЦНИИЛГиС.

В период с 1981 по 1984 гг. заочно окончил математический факультет Воронежского государственного университета. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Лесные культуры, селекция, семеноводство и озеленение городов». В 1995 г. Анатолию Петровичу присвоено звание профессора кафедры лесоводства. С 1995 по 2016 гг. преподавал в Петрозаводском государственном университете генетику и селекцию растений, основы интродукции и дендрометрию, работал главным научным сотрудником в Институте леса Карельского научного центра РАН. С 2014 г. по настоящее время – главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института лесной генетики, селекции и биотехнологии (ВНИИЛГИСбиотех).

По материалам исследований А.П. Царевым написано свыше 370 научных работ, в т. ч. 16 монографий и учебников, среди них «Сортовоеведение тополя», «Генетика лесных древесных пород», «Селекция и репродукция лесных древесных растений», «Программы лесной селекции (в России и за рубежом)», «Селекция и сортоиспытание тополей», «Гибридизация тополей» и др. Более 30 статей и тезисов опубликовано за рубежом: Болгария, Хорватия, Китай, Финляндия, Канада, Италия, Великобритания, Чили, Германия, Испания, Белоруссия, Нидерланды, Польша, Сербия, Аргентина, Индия, Южная Корея и др.

А.П. Царев является автором 5 сортов тополя – Белар, Болид, Ведуга, Степная Лада и Э.с.-38.

Анатолий Петрович награжден бронзовой медалью ВДНХ СССР, памятной медалью Н.И. Вавилова, медалью «Ветеран труда», нагрудным знаком «Участник ликвидации последствий аварии на ЧАЭС», является почетным работником высшего профессионального образования РФ, почетным работником лесного хозяйства, имеет медаль «Благодарность от земли Воронежской».

В настоящее время А.П. Царев состоит в ученом совете ВНИИЛГИСбиотех, диссертационном совете ВГЛУ и редакционной коллегии «Лесного журнала».

Поздравляем Анатолия Петровича с юбилеем и желаем крепкого здоровья, долголетия и дальнейших творческих успехов!



СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- А.С. Алексеев, Д.М. Черниковский.* Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований..... 11
- Н.Н. Бессчетнова, В.П. Бессчетнов, Р.Н. Храмов, Н.А. Бабич, В.И. Мелехов.* Синтетические укрытия вегетационных сооружений с интегрированным фотолюминофором в укоренении черенков туи западной..... 29
- И.И. Камалова, М.Ю. Петюренко, А.П. Дегтярева, Н.Ф. Кузнецова, Н.И. Внукова.* Особенности генетической структуры популяции *Pinus sylvestris* L. в степной зоне Европейской России..... 49
- А.А. Карабан, В.А. Усольцев, С.В. Третьяков, С.В. Коптев, А.А. Парамонов, И.В. Цветков.* Возрастная динамика биомассы ольхи серой в древостоях Архангельской области..... 65
- Н.В. Лаур, А.П. Царев, В.А. Царев, Р.П. Царева.* Архивы клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Республике Карелия..... 76
- А.Б. Лысиков, П.Г. Мельник, М.Д. Мерзленко, А.В. Колесников.* Изменения дерново-подзолистой почвы в лесных культурах лиственницы европейской за длительный период..... 90
- А.Е. Осипенко, С.В. Залесов.* Формирование морфологии деревьев культивируемых сосновых древостоев..... 105

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- С.А. Чудинов.* Фиброцементогрунт в устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог..... 118
- В.О. Никонов, В.И. Посметьев, А.Ю. Мануковский, В.В. Посметьев, И.В. Сизьмин.* Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного дышла лесовозного автопоезда..... 128

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- В.Н. Ермолин, М.А. Баяндин, А.В. Намятов, Н.В. Смертин.* Древесно-композитные плиты с низким коэффициентом линейного теплового расширения..... 142

*ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ
И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ*

- Л.В. Юртаева, Ю.Д. Алашкевич, Е.А. Слизикова, Е.В. Каплёв, С.А. Пожаркова.* Влияние вида ножевой размалывающей гарнитуры на процесс получения микрокристаллической целлюлозы..... 152
- Д.В. Тарабукин, Е.Н. Патова, И.В. Новаковская.* Перспективы глубокой переработки бумажного шлама с применением ферментов, микродорослей и дрожжей..... 166

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- О.А. Гончарова, О.Е. Зотова.* *Pinus sibirica* Du Tour в условиях интродукции на примере Полярно-альпийского ботанического сада-института 178
- Д.В. Беляков, О.А. Конюшатов, С.А. Корчагов, С.Е. Грибов.* Сохранение видового разнообразия растений при лесопользовании в ключевых биотопах Вологодской области..... 189
- В.Ю. Чернов, И.Г. Гайсин, А.Н. Носова, Е.М. Мальцева.* Водопоглощение термически модифицированного древесного заполнителя термодревесно-цементной композиции..... 201
-

 CONTENTS

FORESTRY

- A.S. Alekseev, D.M. Chernikhovskiy.* Identification of Damage to Coniferous Stands Based on Comprehensive Analysis of the Results of Remote Sensing of the Earth and Ground Surveys..... 11
- N.N. Besschetnova, V.P. Besschetnov, R.N. Khramov, N.A. Babich, V.I. Melekhov.* The Use of Synthetic Shelters with Integrated Photoluminescent Phosphors for Greenhouse Structures in Rooting the Northern White-Cedar Cuttings..... 29
- I.I. Kamalova, M.Yu. Peturenko, A.P. Degtyareva, N.F. Kuznetsova, N.I. Vnukova.* The Genetic Structure Features of the *Pinus sylvestris* L. Population in the Steppe Zone of European Russia..... 49
- A.A. Karaban, V.A. Usol'tsev, S.V. Tret'yakov, S.V. Koptev, A.A. Paramonov, I.V. Tsvetkov.* Age Dynamics of Gray Alder Biomass in the Stands of the Arkhangelsk Region..... 65
- N.V. Laur, A.P. Tsarev, V.A. Tsarev, R.P. Tsareva.* The Archives of Clones of Scots Pine Plus Trees in the Republic of Karelia..... 76
- A.B. Lysikov, P.G. Melnik, M.D. Merzlenko, A.V. Kolesnikov.* The Changes in Sod-Podzolic Soil in European Larch Forest Plantations over a Long Period 90
- A.E. Osipenko, S.V. Zalesov.* Formation of Tree Morphology in Cultivated Pine Stands..... 105

LOGGING TECHNOLOGIES

- S.A. Chudinov.* Fiber Cement Soil in the Construction of Pavements for Logging Roads..... 118
- V.O. Nikonov, V.I. Posmetyev, A.Yu. Manukovskii, V.V. Posmetyev, I.V. Sizmin.* Optimization of the Design Parameters of the Regenerative Rod of a Logging Road Train..... 128

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

- V.N. Ermolin, M.A. Bayandin, A.V. Namyatov, N.V. Smertin.* Wood-Composite Boards with a Low Coefficient of Linear Thermal Expansion..... 142

*TECHNOLOGY OF CHEMICAL WOOD PROCESSING
AND PRODUCTION OF WOOD-POLYMER COMPOSITES*

*L.V. Yurtayeva, Yu.D. Alashkevich, E.A. Slizikova, E.V. Kaplyov, S.A. Pozhar-
kova. The Effect of the Knife Tacking Type on the Process of Producing
Microcrystalline Cellulose.....* 152

*D.V. Tarabukin, E.N. Patova, I.V. Novakovskaya. The Prospects for Advanced
Processing of Paper Sludge Using Enzymes, Microalgae and Yeast.....* 166

BRIEF SUMMARIES AND EXPERIENCE EXCHANGE

*O.A. Goncharova, O.E. Zotova. Pinus Sibirica Du Tour in the Conditions of In-
troduction by the Example of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute.* 178

*D.V. Belyakov, O.A. Konyushatov, S.A. Korchagov, S.E. Gribov. The Conserva-
tion of Plant Species Diversity in Forest Management in the Key Biotopes
of the Vologda Region.....* 189

*V.Yu. Chernov, I.G. Gaisin, A.N. Nosova, E.M. Maltseva. Water Absorption
of Thermally Modified Wood Filler of Thermal Wood-Cement Com-
position.....* 201



Научная статья

УДК 630*5:528.85:630*9

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28

Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований

А.С. Алексеев[✉], *д-р геогр. наук, проф.*; *ResearcherID: F-6891-2010*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-2888>

Д.М. Черниковский, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID: I-7020-2016*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6375-3080>

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; a_s_alekseev@mail.ru[✉],
cherndm2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.04.22 / Одобрена после рецензирования 03.08.22 / Принята к печати 05.08.22

Аннотация. Повреждение лесных насаждений и их гибель в результате вспышки вредных насекомых и болезней отмечаются на значительных площадях и представляют собой важную лесохозяйственную проблему. Для ее решения целесообразно использовать материалы дистанционного зондирования Земли, т. к. поврежденные и погибшие леса могут занимать большие, удаленные друг от друга территории. В статье представлена методика оценки состояния древостоев и влияния на них вредителей и болезней леса, основанная на совместной обработке данных регулярной сети пробных площадей и материалов дистанционного зондирования Земли с помощью геоинформационных технологий, дисперсионного и регрессионного анализа. Пробные площади были заложены по методике ICP-Forests и характеризовали общий фон состояния лесов на изучаемой территории северо-западной и центральной частей Ленинградской области, на которой одновременно были обнаружены очаги размножения вредителей и болезней леса. Проведена оценка применимости 2 вегетационных индексов – нормализованного дифференциального (NDVI) и коротковолнового (SWVI), а также индекса влажности растительного покрова (NDMI) и пожарного индекса (NBR), спектральных характеристик соответствующих каналов снимка Sentinel-2B для выявления очагов повреждения лесов вредителями и болезнями. Установлены статистически достоверные связи между состоянием насаждений и перечисленными индексами. Показано, что очаги размножения вредителей и болезней достоверно выявляются с помощью материалов дистанционного зондирования Земли на общем фоне состояния лесов, представленном регулярной сетью пробных площадей. Разработана тематическая карта насаждений, подразделяющая их на 2 группы классов состояния: здоровые и ослабленные; отмирающие и сухостой. Методом опорных векторов проведена оценка ее точности на основе совмещения наземных и дистанционных данных. Для оценки адекватности автоматической классификации была использована матрица ошибок с вычис-

© Алексеев А.С., Черниковский Д.М., 2024

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

лением индекса Каппа, который оказался равным 0,878, что свидетельствует о высоком качестве классификации. Показано, что разработанная тематическая карта применима для обнаружения потенциальных очагов размножения вредителей и болезней леса на изучаемой территории.

Ключевые слова: ICP-Forests, классы состояния, дистанционные методы, Sentinel-2B, автоматическая классификация изображений, метод опорных векторов, вегетационный индекс, индекс влажности растительного покрова, пожарный индекс, тематическая карта, Ленинградская область

Благодарности: Данное исследование проводилось в рамках проекта РНФ № 21-16-00065 «Роль насекомых и патогенов в ослаблении и гибели хвойных древостоев Северо-Запада Российской Федерации: количественная оценка и мониторинг».

Для цитирования: Алексеев А.С., Черниковский Д.М. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 11–28. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-11-28>

Original article

Identification of Damage to Coniferous Stands Based on Comprehensive Analysis of the Results of Remote Sensing of the Earth and Ground Surveys

Aleksandr S. Alekseev[✉], Doctor of Geography; ResearcherID: [F-6891-2010](https://orcid.org/0000-0001-8795-2888),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8795-2888>

Dmitriy M. Chernikhovskiy, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [I-7020-2016](https://orcid.org/0000-0002-6375-3080),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6375-3080>

Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; a_s_alekseev@mail.ru[✉], cherndm2006@yandex.ru

Received on April 30, 2022 / Approved after reviewing on August 3, 2022 / Accepted on August 5, 2022

Abstract. Damage to forest stands and their death as a result of outbreaks of destructive insects and diseases occur over significant areas and represent an important forestry problem. To solve this problem, it is advisable to use materials from remote sensing of the Earth, since damaged and dead forests can occupy significant areas, from remote each other. The article presents a methodology for assessing the state of forest stands and the impact of forest pests and diseases on them based on the joint processing of data from a regular grid of sample plots and materials from remote sensing of the Earth via geoinformational technologies, variance and regression analyses. The sample plots have been laid according to the ICP-Forests methodology and have characterized the general background of the state of the forests in the study area of the North-Western and central parts of the Leningrad Region, where the foci of forest pests and diseases reproduction have been identified at the same time. The applicability of 2 vegetation indices – normalized difference (NDVI) and short-wave (SWVI), as well as the normalized difference moisture index (NDMI), the normalized burn ratio (NBR) and the spectral characteristics of the corresponding channels of the Sentinel-2B image to identify the foci of forest damage by pests and diseases has been assessed. Statistically significant relationships between the state of the stands and the values of the listed indices have been established. It has been shown that the foci of pests and



diseases reproduction are reliably detected using the materials from remote sensing of the Earth against the general background of the state of the forests represented by the regular grid of sample plots. A thematic map of the stands has been developed dividing them into 2 groups of state classes: healthy and weakened stands; suppressed stands and deadwood. Its accuracy was assessed via the support vector machine (SVM) on the basis of the combination of ground and remote sensing data. To assess the adequacy of the automatic classification, the error matrix and the calculation of the Cohen's Kappa coefficient have been used. The coefficient has turned out equal to 0.878, which indicates a high quality of the classification. It has been shown that the developed thematic map is applicable for detecting potential foci of forest pests and diseases reproduction in the study area.

Keywords: ICP-Forests, state classes, remote sensing methods, Sentinel-2B, automatic image classification, support vector machine (SVM), vegetation index, normalized difference moisture index (NDMI), normalized burn ratio (NBR), thematic map, the Leningrad Region
Acknowledgements: This study was conducted within the framework of the the Russian Science Foundation project no. 21-16-00065 “The Role of Insects and Pathogens in the Weakening and Death of Coniferous Forests in the North-West of the Russian Federation: Quantitative Assessment and Monitoring”.

For citation: Alekseev A.S., Chernikhovskiy D.M. Identification of Damage to Coniferous Stands Based on Comprehensive Analysis of the Results of Remote Sensing of the Earth and Ground Surveys. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 11–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-11-28>

Введение

Повреждение лесов насекомыми и болезнями, а также борьба с ними представляют собой важные проблемы устойчивого управления лесами. На рис. 1 показаны площади лесных насаждений, погибших в 2020 г. в Российской Федерации по данным официальной статистики (<https://rosstat.gov.ru/>).

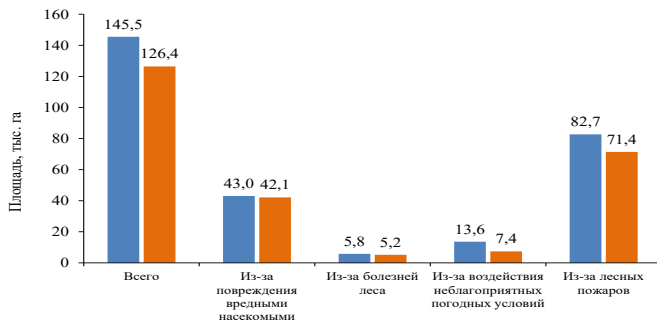


Рис. 1. Площади погибших лесных насаждений в Российской Федерации в 2020 г. (голубой цвет – всех пород, оранжевый – хвойных)

Fig. 1. The areas of dead forest stands in the Russian Federation in 2020 (blue – all species, yellow – coniferous)

Данные рис. 1 показывают, что площадь погибших от повреждения насекомыми лесов занимает 2-е место после площади повреждений, вызванных лесными пожарами. При этом почти все погибшие насаждения – хвойные. От иных причин, не указанных на рис. 1, погибли 392 га лесных насаждений, из них 295 га – хвойные. Таким образом, борьба с вредителями и болезнями леса в Российской Федерации – актуальная проблема, сопоставимая с борьбой с лесными пожарами.

Вопросы, связанные с изучением повреждений лесов по материалам дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), достаточно многообразны. К ним относятся выявление лесных участков, подвергшихся различным видам негативных воздействий (пожары, болезни, насекомые, промышленные выбросы и др.), определение границ повреждений и оценка их степени. Также представляют интерес изучение связей между характеристиками материалов ДЗЗ и поврежденных насаждений, анализ динамики повреждения и восстановления древостоев с использованием методов моделирования и прогнозирования.

Базовые сведения о применении дистанционных методов для оценки состояния поврежденных лесов приведены в ряде пособий и монографий [2, 13, 16, 29]. В этой группе источников содержится информация о возможностях выявления поврежденных насаждений по материалам ДЗЗ, отмечаются признаки поврежденных насаждений на снимках, характерные изменения отражательной способности насаждений при воздействии на них негативных факторов, рассматриваются основы лесоэнтомологического мониторинга. Считается, что дистанционными методами невозможно непосредственно обнаружить наличие вредителей и болезней в насаждении. Однако их присутствие с большой долей вероятности определяется опосредованно, через повреждение лесного полога. Под воздействием негативных факторов среды в клеточных тканях ассимиляционных побегов происходят биохимические реакции, симптомами которых служат нарушения клеточной структуры мезофилла, сопровождаемые изменениями отражательной способности и хода спектральных кривых яркости хвои (листьев), побегов, ветвей, крон или полога насаждений [13].

Определение на основе материалов ДЗЗ контрастных категорий состояния насаждений (здоровых и погибших), заметно отличающихся по спектральным характеристикам, как правило, не представляет трудностей. Но для практики большое значение также имеет выявление переходных (ослабленных и сильно ослабленных) насаждений, что сложно с методической точки зрения. В [34] отмечается, что в связи с неустойчивым проявлением на материалах ДЗЗ признаков дешифрирования ослабленных и усыхающих насаждений дистанционная оценка лесопатологического состояния лесов является одним из наименее разработанных разделов лесного дешифрирования.

Физические основы изменения спектральных характеристик насаждений, поврежденных пожарами, обобщены в работах [3, 4]. Указывается, что при повреждении (усыхании) насаждений в вегетативных органах снижается концентрация хлорофилла. Как следствие – в видимом диапазоне (особенно в красной части) снижается поглощение света и увеличивается отражательная способность. В ближнем инфракрасном диапазоне она падает, в среднем инфракрасном – повышается из-за снижения количества влаги в листе (хвое).

Изучению вспышек массового размножения насекомых-вредителей лесных насаждений и последствий этого посвящено значительное число публикаций [1, 10–12, 18, 21, 22, 39]. Во многих случаях при обследовании больших по площади территорий используются материалы ДЗЗ [10, 12, 18, 21, 30, 33, 39].

В исследованиях, проводимых в начале 2000-х гг. на территории Национального парка «Водлозерский» с целью изучения вспышек массового размножения короеда-типографа, особое внимание уделялось дистанционным

методам. В частности, оценивались возможности применения визуального дешифрирования, а также выполнения автоматических и автоматизированных классификаций [19, 21].

В статье [11] рассмотрены достоинства и недостатки распространенных подходов к оценке состояния поврежденных насаждений на основе дистанционных методов. Указаны особенности применения материалов ДЗЗ разного пространственного и спектрального разрешений с учетом визуального и автоматизированного дешифрирования. Проведено обследование участков, поврежденных короедом-типографом, с использованием съемки Landsat и GeoEye-1 разными методами.

К показателям анализа состояния лесов на основе материалов ДЗЗ относится ряд индексов – нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), коротковолновый вегетационный индекс SWVI (Short Wave Vegetation Index), разностный индекс гарей NBR (Normalized Burn Ratio) [8, 15] и др. [3, 4, 11, 20]. Для оценки содержания влаги в растительности и мониторинга засух может использоваться нормализованный разностный индекс влажности NDMI (Normalized Difference Moisture Index) – <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndmi/>.

Нормализованный индекс NDVI широко распространен для изучения сезонной и многолетней динамики фотосинтетически активной фитомассы растительности. Коротковолновый индекс SWVI отражает стресс растительности вследствие неблагоприятных факторов среды. Данный индекс хорошо зарекомендовал себя в количественной оценке усыхания и повреждения древесной растительности в результате различных деструктивных биотических и абиотических факторов. Использование SWVI позволяет выделять участки растительности с ухудшенным санитарным состоянием, которое связано как с нарушением процесса фотосинтеза при повреждении или гибели хвои, так и с воздействием на лес атмосферной или почвенной засухи. По сравнению с NDVI коротковолновый индекс SWVI обладает более низкой сезонной изменчивостью [39]. При изучении процесса лесовосстановления индекс SWVI оказался более предпочтительным по сравнению с NDVI и NBR при разделении покрытых и непокрытых лесной растительностью земель по космическим снимкам [8].

На основе наблюдений, выполненных при обследовании пробных площадей регулярной сети ICP-Forest на территории Карельского перешейка Ленинградской области в 2019 г., установлены статистически значимые связи между агрегированными классами состояния насаждений и значениями индекса SWVI, а также получены успешные результаты автоматизированной классификации состояния насаждений методом ближайшего соседа [23, 24].

В монографии [6] перечислен ряд исследований, связанных с изучением влияния насекомых на дефолиацию растительности. Представляет интерес методика мониторинга состояния лесов, основанная на анализе отклонения индекса NDVI на основе MODIS от сезонной траектории, разработанная и апробированная на территории Швеции и Финляндии [35, 36]. Авторы методики указывают, что использование данных Sentinel-2 в будущем позволит добиться лучших результатов мониторинга.

В ряде работ применяется последовательность вегетационных индексов, определяемых на основе разновременных снимков (например, до и после по-

жара), – разностного dSWVI и относительного RdSWVI [3–5, 15]. Установлены линейные зависимости средневзвешенной категории состояния насаждений от индексов RdSWVI и RdNDVI для разных регионов. Примечательно, что для проведения подобных исследований помимо снимков, выполненных в течение вегетационного периода, рекомендуется также использовать зимние снимки [15].

Перспективно изучение и иных вегетационных индексов, потенциально отражающих состояние растительности [20], в частности индексов «зелености», рассчитываемых в узких спектральных зонах; индексов содержания пигментов (каротиноидов и антоцианинов); индексов, показывающих содержание влаги в растительном покрове. Возможно применение гиперспектральной съемки для расчета ряда индексов в узких спектральных зонах [7].

В Чехии в целях информационной поддержки правительства результаты мониторинга повреждения лесов насекомыми-вредителями (преимущественно короедом), формируемые путем обработки материалов ДЗЗ, размещаются на веб-сайтах. Для получения итоговых картографических материалов используются разнообразные источники пространственных данных – материалы наземных обследований, лесоустройства, ДЗЗ разного пространственного и временного разрешения, сведения о лесопользовании, модели высот полого и др. [33].

Принципы и подходы к изучению лесов при помощи современных материалов ДЗЗ, дистанционных методов и геоинформационных технологий (ГИС-технологий) отражены в работах [29, 32, 37].

Целью исследования является разработка методов дистанционного мониторинга состояния хвойных пород, позволяющих идентифицировать развитие патологического процесса в них на начальных стадиях.

Задачи:

разработка методики оценки состояния древостоев и влияния вредителей и болезней на основе совместной обработки данных регулярной сети пробных площадей и материалов ДЗЗ с помощью ГИС-технологий;

оценка применимости вегетационных индексов, индекса влажности растительного покрова и пожарного индекса, а также спектральных характеристик соответствующих каналов снимка Sentinel-2В для выявления повреждений лесов;

разработка тематических карт состояния (степени повреждения) насаждений методами автоматической классификации, оценка их точности посредством совмещения наземных и дистанционных данных.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили пробные площади, заложенные на территории Северо-Западного и Рощинского лесничеств, Лисинской части Учебно-опытного лесничества и Гатчинского лесничества Ленинградской области в вегетационный период 2021 г. Выбор модельной территории обусловлен представленностью характерных для Северо-Запада типов леса с преобладанием хвойных насаждений и разными уровнями антропогенной нагрузки. Леса Карельского перешейка испытывают значительные рекреационные нагрузки и характеризуются стабильно самыми худшими средними значениями показате-

лей на всей сети мониторинга ICP-Forests [9]. На территории Лисинской части Учебно-опытного лесничества уровень антропогенной нагрузки считается относительно низким.

При проведении полевых работ по оценке состояния хвойных насаждений использовалась методика ICP-Forests (<http://icp-forests.net/page/icp-forests-manual>), дополненная классической методикой лесопатологических обследований. На каждой пробной площади, на постоянном пункте учета (ППУ), фиксировалось центральное дерево, для которого осуществлялась координатная привязка, затем по 4 сторонам света на расстоянии 25 м от центрального дерева выбирались 4 точки – точки учета. Вокруг каждой из них отмечались 6 ближайших деревьев 1-го и 2-го классов Крафта и определялась их категория состояния. Затем в квадрате, углы которого соответствовали 4 точкам учета, проводился пересчет всех хвойных деревьев с диаметром от 8 см и более. Для каждого дерева определялись категория состояния, наличие вредителей и их видовой состав, отмечались гнили, плодовые тела грибов, механические повреждения и нарушения развития.

Также были использованы результаты наземного мониторинга выявленных в процессе полевых работ очагов массового размножения стволовых вредителей (далее – очагов повреждения). Основными стволовыми вредителями были короед-типограф *Ips typographus* и черные усачи *Monochamus spp.*

Применялись материалы наземных обследований 74 ППУ (25 в ельниках и 29 в сосняках Карельского перешейка, а также 20 в ельниках на территории Лисинской части Учебно-опытного лесничества Ленинградской области). Кроме того, учтены результаты наземного наблюдения за 10 очагами повреждения (9 очагами на территории Карельского перешейка, 1 – в Гатчинском районе). Общее количество обследованных участков составило 84. Далее участки с очагами повреждения были разделены на части в соответствии с площадью одного полигона ППУ (0,3 га). Так был сформирован набор из 143 участков-строк в базе данных: 74 ППУ и 69 участков очагов повреждения. Эта информация использовалась при проведении статистического анализа и автоматизированной классификации материалов ДЗЗ.

С помощью сервиса <https://earthexplorer.usgs.gov/> получены космические снимки Sentinel-2B (уровень обработки Level-1C) модельной территории за период с мая по ноябрь 2021 г. Использовались следующие спектральные каналы: B4 – красный (Red, центральная длина волны – 665 нм), B8 – ближний инфракрасный (NIR, 833 нм), B8A – «узкий» ближний инфракрасный (Narrow NIR, 864 нм), B11 – средний инфракрасный (SWIR, 1610 нм), B12 – средний инфракрасный (SWIR, 2186 нм). Материалы съемки (22 ноября 2021 г.) 3 сцен Sentinel-2B объединены в единое многозональное изображение.

Совмещение и анализ пространственных данных выполнялись средствами ГИС QGIS. Координаты центров ППУ, определенные средствами GPS при проведении наземных обследований, экспортировались в ГИС. Вокруг сформированных по координатам точек строились буферные зоны радиусом 30 м. В качестве атрибутов векторных полигонов указывались номер ППУ, средний класс состояния и краткие таксационные характеристики, полученные в результате наземных обследований. Средствами ГИС для каждой пробной площади были

определены средние значения спектральных яркостей по отдельным каналам, а также рассчитаны средние значения индексов.

Расположение пробных площадей на изучаемой территории показано на рис. 2.



Рис. 2. Расположение пробных площадей на модельной территории, покрытой съемкой Sentinel-2B. Красными точками показаны ППУ и очаги повреждения

Fig. 2. The location of sample plots in the model area covered by the Sentinel-2B survey. The red dots show the permanent stations and the damage foci

Индексы NDVI, SWVI, NDMI и NBR рассчитывались на основе материалов съемки Sentinel-2B по формулам:

$$\begin{aligned} \text{NDVI} &= (B8 - B4) / (B8 + B4); \\ \text{SWVI} &= (B8 - B11) / (B8 + B11); \\ \text{NDMI} &= (B8A - B11) / (B8A + B11); \\ \text{NBR} &= (B8 - B12) / (B8 + B12). \end{aligned}$$

Связь классов состояния древостоев и индексов оценивалась с помощью методов математической статистики (корреляционного, дисперсионного и регрессионного анализа) в программах MS Excel и Statgraphics.

Для построения тематической карты с целью выявления потенциальных мест расположения очагов повреждения лесов вредителями и болезнями проводилась автоматизированная классификация спутникового снимка, представленного на рис. 2, методом опорных векторов (SVM – Support Vector Machine) [27, 31]. При классификации рассматривались 2 группы насаждений: здоровые, ослабленные и умеренно ослабленные (ППУ); отмирающие, свежий сухостой и старый сухостой (очаги повреждения). Классификация проводилась в ГИС Saga [26, 28].

Для выполнения автоматизированной классификации исходный набор данных в ГИС был случайным образом разделен на 2 части – тренировочную (58 участков) и тестовую (85). Тренировочная часть использовалась для обучения программы по алгоритму SVM, тестовая – для оценки качества классификации. Последняя осуществлялась путем построения и анализа матрицы ошибок и расчета индекса Каппа [17, 25].

Результаты исследования и их обсуждение

С целью определения характеристик материалов ДЗЗ, значимых при выявлении поврежденных насаждений, проведена оценка динамики спектральных яркостей отдельных каналов и индексов для пробных площадей с мая по ноябрь 2021 г. (рис. 3 и 4).

Однозначно установить причины естественного варьирования спектральных яркостей и вегетационных индексов здоровых насаждений затруднительно. Варьирование значений индексов и спектральных яркостей может быть обусловлено динамикой содержания хлорофиллов в хвое [14]. Причинами многолетней динамики спектральных яркостей насаждений становятся также различия в стадиях лесообразования, типе леса, доле хвойных пород в составе [38].

Важным практическим вопросом данного исследования является выяснение характеристик материалов ДЗЗ, позволяющих отличать поврежденные насаждения от здоровых и ослабленных. Сложность решения такой задачи состоит во временном «отставании» признаков повреждения насаждений на материалах ДЗЗ от фактического состояния насаждения, отмечаемого при наземном обследовании. Так, при обследовании очагов повреждения в ноябре 2021 г. отмечалось, что больше 1/2 деревьев заселены 2-м поколением типографа. Активное заселение этих насаждений вредителями происходило в течение всего вегетационного периода. Полное усыхание древостоев в выявленных очагах прогнозировалось в 2022 г. Но на период обследования внешних признаков повреждений насаждения на материалах ДЗЗ не наблюдалось.

Если по графикам изменения спектральных яркостей отдельных каналов (рис. 3) трудно установить закономерности, характерные для поврежденных насаждений, то на графиках динамики индексов (рис. 4) такая тенденция видна: расхождения средних значений между ослабленными (ППУ) и усыхающими (очаги повреждения) насаждениями начинают явно прослеживаться с начала осени и затем усиливаются. Эта закономерность также подтверждается результатами дисперсионного анализа.

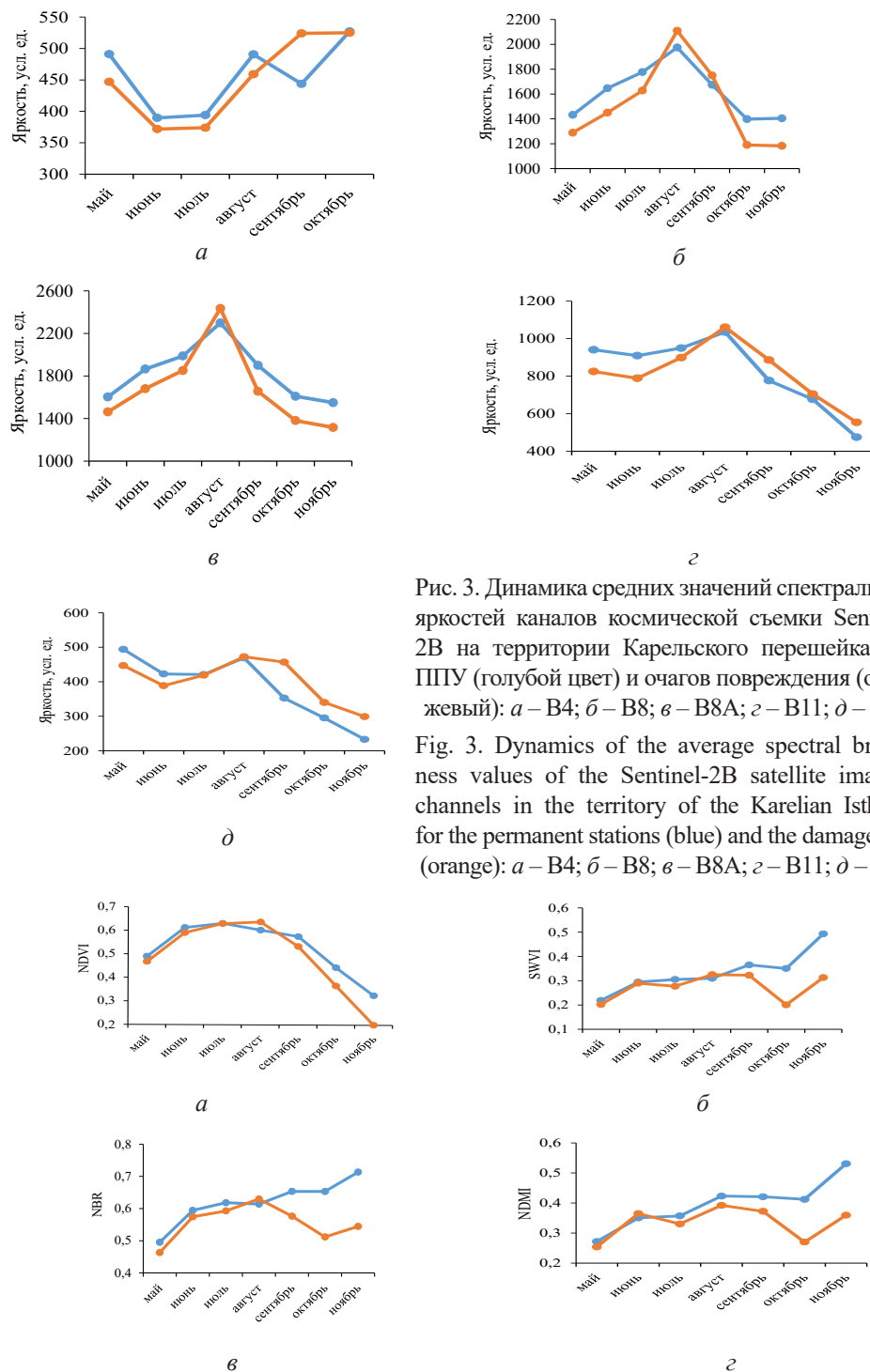


Рис. 3. Динамика средних значений спектральных яркостей каналов космической съемки Sentinel-2B на территории Карельского перешейка для ППУ (голубой цвет) и очагов повреждения (оранжевый): а – В4; б – В8; в – В8А; г – В11; д – В12

Fig. 3. Dynamics of the average spectral brightness values of the Sentinel-2B satellite imagery channels in the territory of the Karelian Isthmus for the permanent stations (blue) and the damage foci (orange): а – В4; б – В8; в – В8А; г – В11; д – В12

Рис. 4. Динамика средних значений индексов на территории Карельского перешейка для ППУ (голубой цвет) и очагов повреждения (оранжевый): а – NDVI; б – SWVI; в – NBR; г – NDMI

Fig. 4. Dynamics of the average index values in the territory of the Karelian Isthmus for the permanent stations (blue) and the damage foci (orange): а – NDVI; б – SWVI; в – NBR; г – NDMI

В табл. 1 и на рис. 5 приведены результаты дисперсионного анализа различий индексов ППУ и индексов очагов повреждения.

Таблица 1

Результаты дисперсионного анализа различий индексов SWVI, NDVI, NDMI и NBR для древостоев регулярной сети пробных площадей и очагов повреждения

The results of the variance analysis of the differences in the SWVI, NDVI, NDMI and NBR indices for the stands of the regular grid of sample plots and damage foci

Источник изменчивости	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат	Критерий Фишера	Вероятность ошибки
<i>SWVI</i>					
Между группами	1,0205	1	1,0205	356,03	0
Внутри групп	0,4041	141	0,0029	–	–
<i>Всего</i>	1,4246	142	–	–	–
<i>NDVI</i>					
Между группами	0,4912	1	0,4912	98,88	0
Внутри групп	0,7005	141	0,0050	–	–
<i>Всего</i>	1,1917	142	–	–	–
<i>NDMI</i>					
Между группами	0,9297	1	0,9297	374,58	0
Внутри групп	0,3500	141	0,0025	–	–
<i>Всего</i>	1,2797	142	–	–	–
<i>NBR</i>					
Между группами	0,7919	1	0,7919	254,24	0
Внутри групп	0,4392	141	0,0031	–	–
<i>Всего</i>	1,2311	142	–	–	–

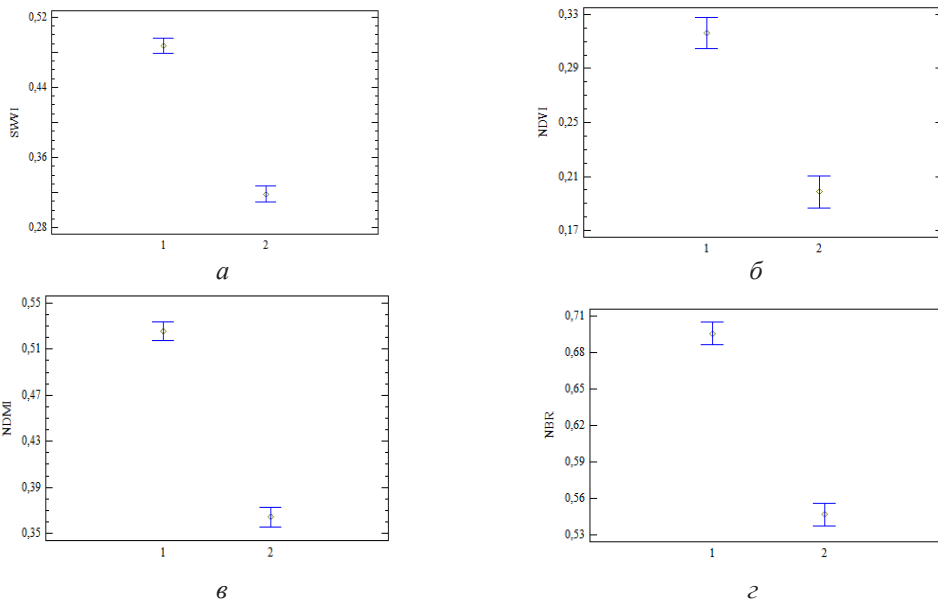


Рис. 5. Средние значения и их 95%-е доверительные интервалы индексов SWVI (а), NDVI (б), NDMI (в) и NBR (г) для древостоев регулярной сети пробных площадей (1) и очагов повреждения (2)

Fig. 5. The average values and their 95% confidence intervals of the SWVI (a), NDVI (б), NDMI (в) and NBR (г) indices for the stands of the regular grid of sample plots (1) and damage foci (2)

Данные табл. 1 и рис. 5 показывают, что все 4 индекса позволяют статистически достоверно выявлять очаги повреждения леса на фоне текущего состояния древостоев изучаемой территории. Во всех случаях 95%-е доверительные интервалы средних значений индексов не пересекаются для ППУ и очагов повреждения и отношение средних значений достигает 1,6 для индекса NDVI и 1,53 для индекса SWVI. Наивысшие значения критерия Фишера получены для индексов NDMI и SWVI. По совокупности этих оценок наиболее подходит для выявления очагов повреждения коротковолновый вегетационный индекс SWVI.

Начиная с сентября между вегетационными индексами и классами состояния насаждений отмечаются регрессионные связи с достаточно высокими коэффициентами детерминации. В табл. 2 приведены результаты регрессионного анализа связи классов состояния насаждений с индексами в ноябре.

Таблица 2

Результаты линейного и нелинейного регрессионного анализа классов состояния насаждений и значений индексов SWVI, NDVI, NDMI, NBR
The results of the linear and nonlinear regression analysis of the stands state classes and the SWVI, NDVI, NDMI and NBR index values

Индекс	Линейная регрессия, класс состояния = $b - a \cdot \text{индекс}$	Нелинейная регрессия, класс состояния = $a - (b / (1 + c \cdot \exp(-d \cdot \text{индекс})))$
SWVI	$5,92 - 7,1 \cdot \text{SWVI}$ ($R^2 = 66,43$)	$5,1 - (4,2 / (1 + 53,20 \cdot \exp(-9,59 \cdot \text{SWVI})))$ ($R^2 = 71,3$)
NDVI	$4,85 - 6,78 \cdot \text{NDVI}$ ($R^2 = 48,49$)	$5,18 - (4,39 / (1 + 8,81 \cdot \exp(-7,91 \cdot \text{NDVI})))$ ($R^2 = 49,42$)
NDMI	$6,25 - 7,21 \cdot \text{NDMI}$ ($R^2 = 67,19$)	$5,14 - (5,02 / (1 + 73,23 \cdot \exp(-8,67 \cdot \text{NDMI})))$ ($R^2 = 72,66$)
NBR	$7,22 - 6,73 \cdot \text{NBR}$ ($R^2 = 62,38$)	$5,17 - (6,36 / (1 + 196,71 \cdot \exp(-7,22 \cdot \text{NBR})))$ ($R^2 = 68,89$)

Примечание: a, b, c и d – коэффициенты уравнений; R^2 – коэффициент детерминации, %.

Из данных табл. 2 следует, что более точно класс состояния насаждений описывается нелинейной зависимостью от индексов. Наиболее тесная нелинейная связь существует между средним классом состояния насаждений на пробных площадях и индексами NDMI и SWVI (с коэффициентами детерминации более 70 %).

Помимо выявления связей между классами состояния и спектральными характеристиками материалов ДЗЗ важно определение пространственного расположения поврежденных участков. Формирование тематических карт состояния (повреждения) насаждений может выполняться как на основе регрессионных зависимостей классов состояния от характеристик материалов ДЗЗ, так и на основе результатов автоматизированной классификации космических снимков по состоянию насаждений.

Результат классификации и тематическая карта для 2 групп классов состояния насаждений продемонстрированы на рис. 6, матрица ошибок приведена в табл. 3.

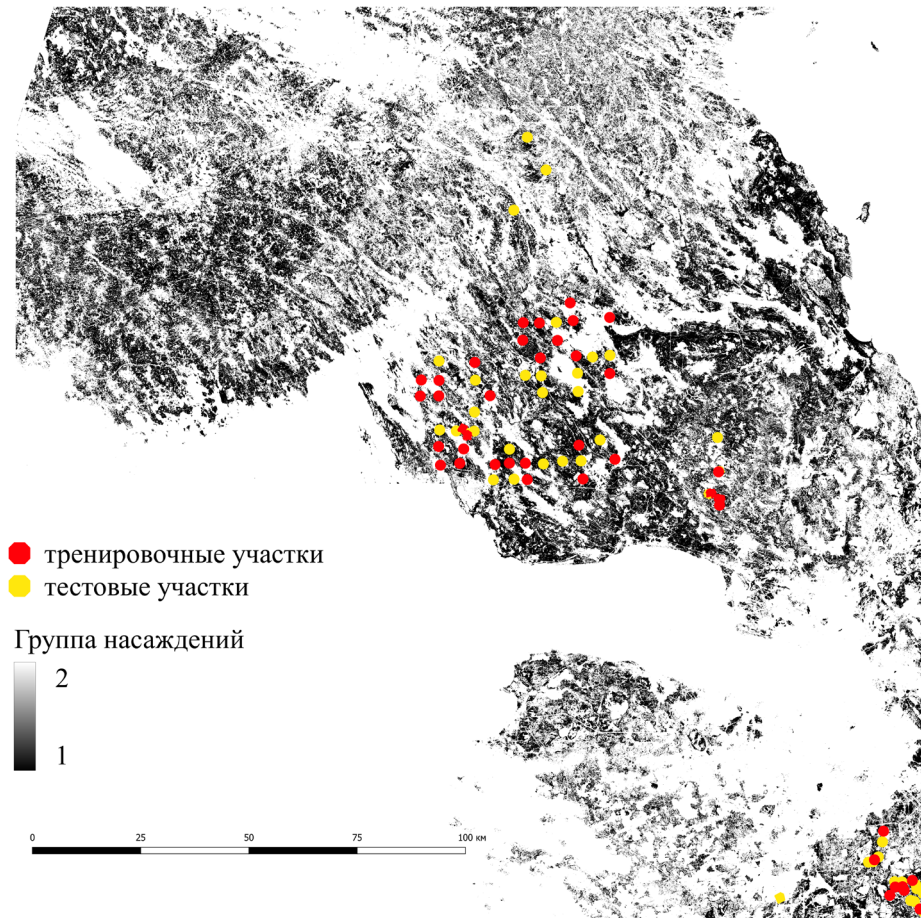


Рис. 6. Тематическая карта результатов классификации состояния насаждений методом опорных векторов по группам классов состояния: 1 – здоровые, ослабленные, умеренно ослабленные; 2 – отмирающие, свежий и старый сухостой

Fig. 6. The thematic map of the results of the stands state classification via the support vector machine (SVM) for two groups of state classes: 1 – healthy, weakened and moderately weakened; 2 – suppressed, fresh and old deadwood

Таблица 3

Матрица ошибок автоматизированной классификации спутникового снимка
The error matrix for the automated classification of the satellite image

Результаты классификации	Фактические наземные данные			
	1*	2*	Сумма	Ошибка пропуска
1*	32	0	32	0
2*	5	48	53	0,094
Сумма	37	48	85	
Ошибка дополнения	0,135	0		

*1 – здоровые, ослабленные, умеренно ослабленные насаждения; 2 – отмирающие, свежий и старый сухостой. Согласованность (точность) – 0,941; случайная согласованность – 0,516; индекс Каппа – 0,878.

Данные табл. 3 показывают высокую степень точности автоматизированной классификации спутникового снимка по 2 группам классов состояния методом опорных векторов. Точность классификации составила 0,941, индекс Каппа – 0,878. Поэтому тематическая карта, построенная по результатам такой классификации на основе совместной обработки материалов космической съемки и наземных обследований, применима для обнаружения потенциальных очагов повреждения лесных экосистем. Источниками повреждений при этом могут быть болезни, воздействие насекомых, лесные пожары, неблагоприятные погодные условия и иные причины.

Выводы

Результаты проведенного анализа позволяют сделать следующие выводы относительно возможностей выявления на актуальных спутниковых снимках очагов повреждения леса стволовыми вредителями:

1. Для получения наиболее достоверных результатов материалы ДЗЗ должны анализироваться совместно с данными наземных обследований, которые необходимы для проведения автоматизированной классификации.

2. Для выявления сильно поврежденных (усыхающих) насаждений могут быть использованы вегетационные индексы NDVI и SWVI, а также индексы влажности растительного покрова NDMI и пожарный индекс NBR. Наиболее подходящим для выявления очагов повреждения является коротковолновый вегетационный индекс SWVI.

3. Отличие значений всех индексов для усыхающих насаждений от значений для здоровых начинает проявляться с начала осени. К концу этого сезона отличия усиливаются и становятся статистически достоверными.

4. Между состоянием насаждений и характеристиками материалов ДЗЗ существуют достоверные статистические связи, что подтверждается результатами дисперсионного и регрессионного анализа.

5. Тематическое картирование насаждений по 2 группам классов состояния (здоровые и ослабленные; отмирающие и сухостой) методом опорных векторов дало положительные результаты с высокой степенью точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ахматович Н.А., Селиховкин А.В., Магдеев Н.Г. Управление рисками в Республике Татарстан: вредители и болезни основных лесообразующих пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2015. № 1. С. 21–34.

Akhmatovich N.A., Selikhovkin A.V., Magdeev N.G. Risk Management in the Republic of Tatarstan: Pests and Diseases of the Main Forest Forming Plants. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2015, no. 1, pp. 21–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2015.1.21>

2. Аэрокосмические методы в охране природы и в лесном хозяйстве / под ред. В.И. Сухих, С.Г. Синицына. М.: Лесн. пром-сть, 1979. 287 с.

Aerospace Methods in Nature Conservation and Forestry. Ed. by V.I. Sukhikh, S.G. Sinitsyna. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 287 p. (In Russ.).

3. Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по дан-

ным многоспектральных спутниковых измерений // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 215–225.

Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stytsenko F.V., Khovratovich T.S. The Evaluation of Possibilities to Assess Forest Burnt Severity Using Multi-Spectral Satellite Data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2010, vol. 7, no. 3, pp. 215–225. (In Russ.).

4. *Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Луян Е.А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A. Satellite-Based Assessment of Russian Forest Fire Mortality. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2015, no. 2, pp. 83–94. (In Russ.).

5. *Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Луян Е.А.* Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 6. С. 176–193.

Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Khvostikov S.A., Loupian E.A. Methodology of Post-Fire Tree Mortality Monitoring and Prediction Using Remote Sensing Data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2017, vol. 14, no. 6, pp. 176–193. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-176-193>

6. *Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Демисева Е.Н., Меньшиков С.А., Али М.С., Смирнова Л.Н., Тарасова Л.В.* Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем / под общ. ред. проф. Э.А. Курбанова. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. 166 с.

Vorobiev O.N., Kurbanov E.A., Demisheva E.N., Menshikov S.A., Ali M.C., Smirnova L.N., Tarasova L.V. *Remote Monitoring of Forest Ecosystems Sustainability*. Ed. by prof. E.A. Kurbanov. Yoshkar-Ola, Volga State University of Technology, 2019. 166 p. (In Russ.).

7. *Григорьева О.В.* Наблюдение деградации лесов по данным гиперспектрального аэро- и космического зондирования // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 43–48.

Grigoryeva O.V. Observation of Forest Degradation Using Hyperspectral Data Aerial and Satellite Sensing. *Earth Observation and Remote Sensing*, 2014, no. 1, pp. 43–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S020596141306002X>

8. *Карпов А., Васке Б.* Метод отнесения земель к землям, занятым лесной растительностью, по аэрокосмическим снимкам Landsat // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 83–92.

Karpov A., Waske B. Method for Transferring Non-Forest Cover to Forest Cover Land Using Landsat Imageries. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 3, pp. 83–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-83-92>

9. *Князева С.В., Эйдлина С.П.* Картографическая оценка динамики показателей состояния древесных растений северо-западных регионов России // Вопр. лесн. науки. 2018. Т. 1(1). С. 1–33.

Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Cartographic Estimation of Tree Parameter Dynamics in Russian Northwest Regions. *Voprosy lesnoy nauki* = Forest Science Issues, 2018, vol. 1(1), pp. 1–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-33>

10. *Ковалев А.В.* Анализ устойчивости лесных насаждений к повреждениям сибирским шелкопрядом по данным дистанционного зондирования // Сиб. лесн. журн. 2021. № 5. С. 71–78.

Kovalev A.V. Analysis of Forest Stands Resistance to Siberian Silkmoth Attack According to Remote Sensing Data. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2021, no. 5, pp. 71–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20210508>

11. *Крылов А.М., Соболев А.А., Владимирова Н.А.* Выявление очагов короеда-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2011. № 4. С. 54–60.

Krylov A.M., Sobolev A.A., Vladimirova N.A. Revealing of Centers *Ips typographus* in Moscow Region with Use of Pictures Landsat. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2011, no. 4, pp. 54–60. (In Russ.).

12. Малахова Е.Г., Крылов А.М. Усыхание ельников в Клинском лесничестве Московской области // Изв. СамНЦ РАН. 2012. Т. 14, № 1(8). С. 1975–1978.

Malakhova E.G., Krylov A.M. The Fir Groves Drying in Klinsky Forestry of Moscow Oblast. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 1(8), pp. 1975–1978. (In Russ.).

13. Методы мониторинга вредителей и болезней леса / под общ. ред. В.К. Тузова. М.: ВНИИЛМ, 2004. 200 с.

Methods for Monitoring Forest Pests and Diseases. Ed. by V.K. Tuzov. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 200 p. (In Russ.).

14. Силкина О.В., Винокурова Р.И. Сезонная динамика содержания хлорофиллов и микроэлементов в формирующейся хвое *Abies sibirica* и *Picea abies* // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 6. С. 864–870.

Silkina O.V., Vinokurova R.I. Seasonal Dynamics of Chlorophyll and Microelement Content in Developing Conifer Needles of *Abies sibirica* and *Picea abies*. *Fiziologiya Rasteniy* = Russian Journal of Plant Physiology, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 864–870. (In Russ.).

15. Стыценок Ф.В., Барталев С.А., Букась А.В., Ершов Д.В., Сайгин И.А. Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозеленых лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современ. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 5. С. 217–227.

Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Bukas A.V., Ershov D.V., Saigin I.A. The Possibilities of Prolonged Burnt Severity Assessment of Evergreen Coniferous Forest Using Multi-Spectral Satellite Data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 217–227. (In Russ.). <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227>

16. Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.

Sukhikh V.I. *Aerospace Methods in Forestry and Landscape Construction*. Yoshkar-Ola, MarSTU Publ., 2005. 392 p. (In Russ.).

17. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли. Томск: ТПУ, 2010. 148 с.

Tokareva O.S. *Processing and Interpretation of the Earth Remote Sensing Data*. Tomsk, TPU Publ., 2010. 148 p. (In Russ.).

18. Федотова Е.В., Заречнева А.И. Пространственно-временная динамика вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в темнохвойных древостоях Горного Алтая // Журн. СФУ. Сер.: Техника и технологии. 2017. Т. 10, № 6. С. 747–757.

Fedotova E.V., Zarechneva A.I. Spatial-Temporal Dynamics of Siberian Silkmoth Outbreak in Dark Needle Coniferous Forest in Altay Mountains. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2017, vol. 10, no. 6, pp. 747–757. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-747-757>

19. Хумала А.Э., Полевой А.В., Шалаев В.С., Галкин Ю.С., Щербаков А.Н., Нальдеев Д.Ф., Никула А., Ройнинен Х. Оценка возможности применения аэрокосмических методов для мониторинга лесного покрова в Национальном парке «Водлозерский» // Водлозерские чтения: естественнонаучные и гуманитарные основы природоохранной, научной и просветительской деятельности на охраняемых природных территориях Русского Севера: материалы науч.-практ. конф., посвящ. 15-летию Нац. парка «Водлозерский», Петрозаводск, 27–28 апр. 2006 г. Петрозаводск: КарНЦ, 2006. С. 106–112.

Khumala A.E., Polevoy A.V., Shalaev V.S., Galkin Yu.S., Shcherbakov A.N., Naldeev D.F., Nikula A., Rojnenin H. Assessment of the Possibility of Using Aerospace Methods for Monitoring Forest Cover in the «Vodlozersky» National Park. *Vodlozersky Readings: Natural Science and Humanitarian Foundations of Environmental, Scientific and Educational Activities in Protected Natural Areas of the Russian North*: Materials of the Scientific and Practical Conference Dedicated to the 15th Anniversary of the “Vodlozersky” National Park (Petrozavodsk, April 27–28, 2006). Petrozavodsk, Karelian Research Centre Publ., 2006, pp. 106–112. (In Russ.).

20. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.

Cherepanov A., Druzhinina E. Spectral Characteristics of Vegetation and Vegetation Indexes. *Geomatica* = Geomatics, 2009, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.).

21. Шаталов А.В., Жирин В.М., Сухих В.И., Эйдлиня С.П., Шалаев В.С. К оценке повреждения лесов Национального парка «Водлозерский» по космическим изображениям // Водлозерские чтения: естественнонаучные и гуманитарные основы природоохранной, научной и просветительской деятельности на охраняемых природных территориях Русского Севера: материалы науч.-практ. конф., посвящ. 15-летию Нац. парка «Водлозерский», Петрозаводск, 27–28 апр. 2006 г. Петрозаводск: КарНЦ, 2006. С. 102–106.

Shatalov A.V., Zhirin V.M., Sukhikh V.I., Eydlina S.P., Shalaev V.S. To the Assessment of Damage to the Forests of the «Vodlozersky» National Park Based on Satellite Images. *Natural Science and Humanitarian Foundations of Environmental, Scientific and Educational Activities in Protected Natural Areas of the Russian North*. Materials of the Scientific and Practical Conference Dedicated to the 15th Anniversary of the “Vodlozersky” National Park (Petrozavodsk, April 27–28, 2006). Petrozavodsk, Karelian Research Centre Publ., 2006, pp. 102–106. (In Russ.).

22. Шелуха В.П., Шошин В.И., Ключев В.С. Динамика санитарного состояния ельников в период кульминации размножения типографа и эффективность лесозащитных мероприятий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2014. № 2. С. 30–39.

Shelukho V.P., Shoshin V.I., Klyuev V.S. Sanitary State Dynamics of Spruce Forests Under Culminating *Ips typographus* Reproduction and Efficiency of Forest-Protection Measures. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2014, no. 2, pp. 30–39. (In Russ.).

23. Alekseev A., Chernikhovskii D. Assessment of the Health Status of Tree Stands Based on Sentinel - 2B Remote Sensing Materials and the Short-Wave Vegetation Index SWVI. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 876, art. no. 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/876/1/012003>

24. Alekseev A., Chernikhovskii D., Vetrov L., Gurjanov M., Nikiforchin I. Determination of the State of Forests Based on a Regular Grid of Ground-Based Sample Plots and Sentinel-2B Satellite Imagery Using the k-NN («Nearest Neighbour») Method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 876, art. no. 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/876/1/012002>

25. Congalton R.G., Green K. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. Principles and Practices*. 3rd ed. Boca Raton, CRC Press, 2019. 346 p. <https://doi.org/10.1201/9780429052729>

26. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhrner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 2015, vol. 8, iss. 7, pp. 1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>

27. Fan R.-E., Chen P.-H., Lin C.-J. Working Set Selection Using Second Order Information for Training Support Vector Machines. *Journal of Machine Learning Research*, 2005, vol. 6, pp. 1889–1918.

28. Fisher R., Hobgen S., Mandaya I., Kaho N., Zulkarnain N. *Satellite Image Analysis and Terrain Modelling. A Practical Manual for Natural Resource Management, Disaster Risk and Development Planning Using Free Geospatial Data and Software. Version 2. SAGA GIS 4*. Charles Darwin University, 2017. 150 p.
29. Franklin S.E. *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. Boca Raton, CRC Press, 2001. 424 p. <https://doi.org/10.1201/9781420032857>
30. Kharuk V.I., Ranson K.J., Kozuhovskaya A.G., Kondakov Y.P., Pestunov I.A. NOAA/AVHRR Satellite Detection of Siberian Silkmoth Outbreaks in Eastern Siberia. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, vol. 25, iss. 24, pp. 5543–5556. <https://doi.org/10.1080/01431160410001719858>
31. Hsu C.-W., Chang C.-C., Lin C.-J. *A Practical Guide to Support Vector Classification*, 2016. 16 p.
32. Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 7th ed. New York, Wiley Inc., 2015. 736 p.
33. Lukeš P. Monitoring of Bark Beetle Forest Damages. *Big Data in Bioeconomy*. Springer Publ., 2021, chapt. 26, pp. 351–361. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71069-9_26
34. Nelson R.F. Detecting Forest Canopy Change Due to Insect Activity Using Landsat MSS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1983, vol. 49, no. 9, pp. 1303–1314.
35. Olsson P.-O., Kantola T., Lyytikäinen-Saarenmaa P., Jönsson A.M., Eklundh L. Development of a Method for Monitoring of Insect Induced Forest Defoliation – Limitation of MODIS Data in Fennoscandian Forest Landscapes. *Silva Fennica*, 2016, vol. 50, no. 2, art. no. 1495. <https://doi.org/10.14214/sf.1495>
36. Olsson P.-O., Lindström J., Eklundh L. Near Real-Time Monitoring of Insect Induced Defoliation in Subalpine Birch Forests with MODIS derived NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 181, pp. 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.040>
37. *QGIS and Applications in Agriculture and Forest*. Vol. 2. Ed. by N. Baghdadi, C. Mallet, M. Zribi. Wiley Inc., 2018. 368 p.
38. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Dynamics of Spectral Brightness of the Species/Age Structure for Groups of Forest Types on Landsat Satellite Images. *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, vol. 7, pp. 788–796. <https://doi.org/10.1134/S1995425514070142>
39. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. Long-Term Dynamics of Vegetation Indices in Dark Coniferous Forest after Siberian Moth Disturbance. *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, vol. 9, pp. 834–843. <https://doi.org/10.1134/S1995425516070118>

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

Научная статья

УДК 630*232.43+631.535+631.53.031+712.414

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-29-48

Синтетические укрытия вегетационных сооружений с интегрированным фотолюминофором в укоренении черенков туи западной

Н.Н. Бессчетнова¹, *д-р с.-х. наук*; *ResearcherID: H-1343-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7140-8797>

В.П. Бессчетнов², *д-р биол. наук*; *ResearcherID: S-5889-2016*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5024-7464>

Р.Н. Храмов², *канд. физ.-мат. наук*; *ResearcherID: B-9591-2014*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6504-4694>

Н.А. Бабич³, *д-р с.-х. наук, проф.*; *ResearcherID: G-7384-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

В.И. Мелехов³, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: Q-1051-2019*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

¹Нижегородский государственный агротехнологический университет, просп. Гагарина, д. 97, г. Нижний Новгород, Россия, 603107; besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru[✉]


²Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, ул. Институтская, д. 3, г. Пущино, Московская обл., Россия, 142290; khramov30@mail.ru

³Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; forest@narfu.ru, v. melekhov@narfu.ru

Поступила в редакцию 01.03.23 / Одобрена после рецензирования 12.06.23 / Принята к печати 14.06.23

Аннотация. Изучена эффективность применения светокорректирующих укрывных материалов для вегетационных сооружений при укоренении черенков различных декоративных форм и сортов туи западной (*Thuja occidentalis* L.). Испытывали 2 типа укрытий: модифицированный спанбонд плотностью 30 г/м² с интегрированным в его структуру фотолюминофором в концентрации 0,8 % и немодифицированный спанбонд такой же плотности. Люминофором являлся оксисульфид иттрия, легированный европием (Y₂O₂SEu). Анализировали 11 сортов и форм туи: Rheingold, Mr. Bowing Boll, Woodwardii, Tiny Tim, Golden Smaragd, Mirjam, Golden Globe, Danica, Sunkist, Smaragd, Brabant. Тестировали реакцию показателей каллусогенеза и ризогенеза на влияние трансформированного светового потока. Установили положительный эффект применения фотолюминофоров при укоренении стеблевых черенков туи западной. Зафиксировали увеличение характеристик регенерационной способности и пострегенерационного развития корневых систем и надземной части черенков: активности каллусогенеза, количества образовавшихся придаточных корней, длины лидирующего корня, суммарной протяженности корневых систем, высоты надземной части и диаметра корневой шейки. Образование каллуса повысилось с 67,59±2,05 % в контроле до 76,81±1,61 % в варианте с люминофором; количество сформировавшихся придаточных корней – с 9,64±0,43 до 11,44±0,34 шт. соответственно; суммарная протяженность корневых систем – с 64,56±3,70 до 75,52±2,77 см соответственно. Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил существенность различий между испытываемыми формами и сортами в каждом из вариантов укрытий по большинству

© Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Храмов Р.Н., Бабич Н.А., Мелехов В.И., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

тестируемых показателей. Двухфакторный дисперсионный анализ вскрыл достоверный эффект положительного влияния фотолуминофоров на образование каллуса, возникновение придаточных корней, пострегенерационное развитие корневых систем и надземной части черенков.

Ключевые слова: фотолуминофор, светотрансформирующие материалы, теплица, туя западная, черенки, укоренение, регенерационная способность, каллусогенез, корнеобразование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 075-01025-23-01.

Для цитирования: Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Храмов Р.Н., Бабич Н.А., Мелехов В.И. Синтетические укрытия вегетационных сооружений с интегрированным фотолуминофором в укоренении черенков туи западной // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 29–48. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-29-48>

Original article

The Use of Synthetic Shelters with Integrated Photoluminescent Phosphors for Greenhouse Structures in Rooting the Northern White-Cedar Cuttings

*Natal'ya N. Besschetnova*¹, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [H-1343-2019](https://orcid.org/0000-0002-7140-8797),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7140-8797>

Vladimir P. Besschetnov^{1✉}, Doctor of Biology; ResearcherID: [S-5889-2016](https://orcid.org/0000-0001-5024-7464),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5024-7464>

*Robert N. Khramov*², Candidate of Physics and Mathematics;

ResearcherID: [B-9591-2014](https://orcid.org/0000-0001-6504-4694), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6504-4694>

*Nikolai A. Babich*³, Doctor of Agriculture; ResearcherID: [G-7384-2019](https://orcid.org/0000-0001-7463-2519),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-2519>

*Vladimir I. Melekhov*³, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

¹Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, prosp. Gagarina, 97, Nizhny Novgorod, 603107, Russian Federation; besschetnova1966@mail.ru, lesfak@bk.ru[✉]

²Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya, 3, Pushchino, Moscow Region, 142290, Russian Federation; khramov30@mail.ru

³Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; forest@narfu.ru, v.melekhov@narfu.ru

Received on March 1, 2023 / Approved after reviewing on June 12, 2023 / Accepted on June 14, 2023

Abstract. We have explored the effectiveness of using light-correcting covering materials for greenhouse structures when rooting the cuttings of various ornamental forms and varieties of the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.). Two types of shelters have been tested: the modified spunbond at a density of 30 g/m² with a photoluminescent phosphor integrated into its structure at a concentration of 0.8 % and the unmodified spunbond at the same density. Europium-doped yttrium oxysulfide (Y₂O₂SEu) has been chosen as a photoluminescent phosphor. We have analyzed 11 varieties and forms of *Thuja occidentalis* L.: *Rheingold*, *Mr. Bowling Ball*, *Woodwardii*, *Tiny Tim*, *Golden Smaragd*, *Mirjam*, *Golden Globe*, *Danica*, *Sunkist*, *Smaragd* and *Brabant*. The response of the indicators of callusogenesis and



rhizogenesis to the influence of a transformed light flux has been tested. A positive effect of the use of photoluminescent phosphors in rooting the stem cuttings of the northern white-cedar has been established. An increase in the indicators of regenerative ability and post-regenerative development of the root systems and the aboveground parts of the cuttings has been recorded, such as: the activity of callusogenesis, the number of adventitious roots formed, the length of the leading root, the total length of the root system, the height of the aboveground part and the diameter of the root collar. Callusogenesis has increased from 67.59 ± 2.05 % in the check to 76.81 ± 1.61 % when having integrated the photoluminescent phosphor. The number of adventitious roots formed has increased from 9.64 ± 0.43 to 11.44 ± 0.34 pcs., correspondingly. The total length of the root systems has increased from 64.56 ± 3.70 to 75.52 ± 2.77 cm, correspondingly. One-way analysis of variance confirmed the significance of the differences between the tested forms and varieties in each of the shelter options for most of the tested indicators. Two-way analysis of variance has revealed a significant effect of the positive impact of photoluminescent phosphors on callusogenesis, adventitious root formation, post-regenerative development of the root systems and the aboveground parts of the cuttings.

Keywords: photoluminescent phosphor, photo-transforming materials, greenhouse, northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.), cuttings, rooting, regenerative ability, callusogenesis, root formation

Acknowledgements: This work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, state assignment no. 075-01025-23-01.

For citation: Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Khramov R.N., Babich N.A., Melekhov V.I. The Use of Synthetic Shelters with Integrated Photoluminescent Phosphors for Greenhouse Structures in Rooting the Northern White-Cedar Cuttings. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 29–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-29-48>

Введение

Действенной мерой снижения экологической напряженности в границах урбанизированных территорий выступает развитие городского озеленения [7]. Его ядром служат насаждения из деревьев и кустарников, успешно выполняющих санитарно-гигиенические, декоративно-эстетические и рекреационно-бальнеологические функции. К числу таких деревьев относится туя западная (*Thuja occidentalis* L.), представленная многочисленными декоративными формами и сортами [2, 12, 20, 23, 33, 34]. Нередко сдерживающим фактором в активном привлечении высокоэффективных представителей экзотов для решения указанных задач является отсутствие достаточного количества посадочного материала требуемого уровня качества. Его тиражирование требует мобилизации самых разных технологий, включая укоренение черенков в вегетационных сооружениях [5, 6, 35, 39]. Результативность деятельности тепличных хозяйств во многом обусловлена техническими свойствами и оптическими характеристиками применяемых покрытий [9, 13, 14, 17, 25, 26, 32]. Использование в этих целях светообразующих и светокорректирующих пленок и пластиков позволяет регулировать оптические, спектральные и другие параметры светового потока в количественном и качественном отношении [3, 4, 13, 14, 18, 19, 21, 22, 25, 26, 37]. Свет является определяющим условием фотосинтеза для большинства растений зон с умеренным климатом [28], и влияние его физических параметров на жизненно важные процессы в растительных организмах дискутируется достаточно активно [16, 24–28]. Общеизвестна приоритетная роль светопоглощающих пигментов в процессе фотосинтеза

[27–29, 35]. В связи с этим многостороннему и последовательному изучению подвергается пигментный состав широкого списка древесных пород [1, 11, 24, 27]. Вместе с тем единого мнения по данным вопросам не сложилось. Так, при воздействии ультрафиолетовой радиации на псевдотсугу Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) не зафиксировано существенных изменений в содержании хлорофилла [11]. При этом есть сведения об образовании хлорофилла и каротиноидов в темноте [36].

Цель исследования – оценить эффективность применения светотрансформирующего укрытия вегетационных сооружений, состоящего из спанбонда с интегрированным в его структуру неорганическим фотолуминофором при укоренении физиологически активных стеблевых черенков туи западной.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служили стеблевые черенки туи западной, находившиеся в активном физиологическом состоянии. В целях элиминации дифференцирующего влияния нерегулируемых в опыте случайных факторов черенки одновременно заготавливали в периферийной зоне среднего яруса хорошо освещенного участка кроны. Побеги с аномалиями развития и признаками поражения биотическими или абиотическими факторами отбраковывали и исключали из выборки. Испытываемые культивары получили следующие условные обозначения: Rheingold – сорт-1, Mr. Bowing Boll – сорт-2, Woodwardii – сорт-3, Tiny Tim – сорт-4, Golden Smaragd – сорт-5, Mirjam – сорт-6, Golden Globe – сорт-7, Danica – сорт-8, Sunkist – сорт-9, Smaragd – сорт-10, Brabant – сорт-11. Все маточные растения дислоцированы в границах единого опытного участка – дендропарка Нижегородского государственного агроуниверситета с географическими координатами 56°19'43" с. ш. 44°00'07" в. д. и высотой над уровнем моря 141 м. Данная территория включена в зону хвойно-широколиственных лесов и отнесена к району хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации. В организационно-методической схеме опыта исследуемые декоративные формы и сорта были объединены в 4 группы по критериям морфологии строения кроны и пигментации хвои (табл. 1).

Таблица 1

Структура сформированных групп декоративных форм и сортов туи западной в составе анализируемого комплекса для каждого варианта укрытия
The structure of the formed groups of the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) ornamental forms and varieties as part of the analyzed complex for each shelter option

Группа	Морфологические дескрипторы группы		Сорта, декоративные формы <i>Thuja occidentalis</i>
	форма кроны	цвет хвои	
1	Шаровидная	Золотистый	Rheingold, Mirjam, Golden Globe
2		Зеленый	Mr. Bowing Boll, Woodwardii, Tiny Tim, Danica
3	Конусовидная	Золотистый	Golden Smaragd, Sunkist
4		Зеленый	Smaragd, Brabant

В соответствии с принципом единственного логического различия все черенки высаживали по одной схеме размещения (5×10 см) в идентичных по конструкции и метрическим параметрам вегетационных сооружениях. В них поддерживались одинаковые для всех вариантов и повторностей опыта условия: температурный фон, освещенность, орошение, субстрат и пр. Контроль параметров среды осуществляли с помощью автоматической метеостанции Meteoscan PRO 929 RST02929. В качестве субстрата использовали крупнозернистый речной песок, стимулятором роста служил гетероауксин в концентрации 0,02 %, при экспозиции 18 ч. Влияние оптических характеристик укрывного материала вегетационных сооружений тестировали по реакции на него базовых показателей регенерации и пострегенеративного развития корневых систем и надземной части черенков декоративных форм и сортов туи западной (табл. 2).

Таблица 2

Тестируемые показатели регенерации и пострегенеративного развития корневых систем и надземной части черенков туи западной
The tested indicators of regeneration and post-regenerative development of the root systems and the aboveground parts of the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings

Категория показателей	Показатель	Индекс показателя
Регенерационные процессы, происходящие в базальной части черенков	Эффективность каллусогенеза – формирование недифференцированной образовательной ткани (каллуса) на нижнем срезе черенка	1
	Активность корнеобразования – количество придаточных корней, образовавшихся на нижнем срезе одного черенка	2
Пострегенеративное развитие корневых систем черенков	Длина лидирующего корня	3
	Общая протяженность корневых систем	4
	Общая средняя длина придаточных корней	5
	Суммарная длина боковых корней	6
	Средняя длина боковых корней	7
	Доля длины осевого корня в суммарной протяженности корневых систем	8
	Доля длины боковых корней в суммарной протяженности корневых систем	9
	Индекс равномерности развития корневых систем как отношение длины осевого корня к средней длине боковых корней	10
Пострегенеративное развитие надземной части укорененных черенков	Индекс сбалансированности развития корневых систем как отношение длины осевого корня к общей средней длине придаточных корней	11
	Высота надземной части черенков	12
	Диаметр корневой шейки черенков	13
	Сбалансированность развития надземной части как отношение высоты черенка к его диаметру	14

Эффективность применения в качестве укрывного материала промышленно выпускаемого спанбонда с интегрированным в его волокна фотолюминофором (ФЛ) испытана по двум типам укрывных материалов, которые

выступали вариантами (факторами) опыта. Первый тип – модифицированный фототрансформирующий спанбонд (ФС), в структуру которого интегрирован неорганический фотолюминофор – модифицированное укрывное полотно сельскохозяйственного назначения «Агрол» плотностью 30 г/м². Этот укрывной материал разработан Институтом синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН и ЗАО «Полисветан» (Москва). Опытная партия материала была произведена предприятием акционерного общества «Химволокно» г. Щекино Тульской области на основе нетканого термоскрепленного полипропиленового полотна и светотрансформирующей добавки. Введенный в состав укрывного материала фотолюминофор является оксисульфидом иттрия, легированного европием (Y₂O₂SEu) с размерами частиц 2–5 мкм, компании «Люминофор» (г. Фрязино Московской области).

Второй тип – обычный немодифицированный белый спандбонд (ОС) – укрывной материал для теплиц и парников, который также представляет собой нетканое термоскрепленное полипропиленовое полотно (агротекстиль) плотностью 30 г/м². Оно широко применяется для изготовления теплиц и подобных им сооружений, а также для защиты сеянцев, саженцев, кустов и деревьев от повреждения низкими температурами в зимний период. Материал проницаем для воды и воздуха, защищает растения от легких ночных заморозков (до 3–4 °С) и холодных туманов. Данное полотно создает благоприятный микроклимат и увеличивает период вегетации растений. Оба вида спанбонда (ФС и ОС) содержат фотостабилизатор в виде ультрафиолетового адсорбера и имеют достаточно высокую механическую прочность для использования в течение 2–3 сезонов.

Измерения освещенности солнечного излучения, проходящего через текстиль, выполнены в интервале длин волн 380–780 нм при ясном небе с помощью спектрорадиометра MK350N Premium (производство UPRtek – United Power Research Technology Corporation, Тайвань). В указанных испытаниях приемник излучения был направлен на солнце под углом к горизонту 45°, а образцы текстиля помещали непосредственно на окно фотоприемника. Зафиксировано одинаковое для ФС и ОС интегральное пропускание солнечного излучения, близкое к 90 % [9, 25]. Введение в укрывной материал светотрансформирующих добавок (вариант ФС) изменяет спектральный состав солнечного излучения, частично преобразуя ультрафиолетовое излучение солнца в полезный биостимулирующий оранжево-красный свет [9, 25, 26]. Подобные материалы сочетают достоинства обычного агротекстиля с преимуществами укрывных светотрансформирующих пленок [8, 10, 25, 26]. Доза люминесцентного излучения, падающего на растения, получена в ходе дополнительных измерений спектра, пропускаемого силиконовой пленкой плотностью 30 г/м² с повышенным содержанием в ней фотолюминофора. По данным измерений, при интенсивности падающего на растения солнечного излучения 483 Вт/м² расчетная интенсивность дополнительного люминесцентного красного света была около 7 мВт/м². Это составляет очень малую долю (0,0014 %) от фотосинтетически активной радиации, которая используется растениями в процессе фотосинтеза в волновом диапазоне от 400 до 700 нм.

Первичная единица выборки представлена разовым учетом каждого из анализируемых показателей по вариантам и повторностям опыта: количество

адвентивных корней, образовавшихся на черенке; длина отдельного придаточного корня. Измерения высоты надземной части и протяженности корневых систем черенка проводили линейкой с точностью до 1 мм, диаметра шейки корня – электронным штангенциркулем Electronic Digital Caliper G06064731 с точностью до 0,1 мм. Статистический и дисперсионный анализ выполнены с учетом существующих методических разработок [15, 30, 31, 38, 40].

Результаты исследования и их обсуждение

Зафиксировано увеличение показателей регенерационной способности и пострегенерационного развития корневых систем и надземной части черенков: активности каллусогенеза, количества образовавшихся придаточных корней, длины лидирующего корня, суммарной протяженности корневых систем, высоты надземной части и диаметра корневой шейки. Данные о регенеративной способности черенков, полученные опытным путем, представлены на диаграммах (рис. 1, 2). Активность каллусогенеза на черенках форм и сортов туи западной была неодинаковой (рис. 1).

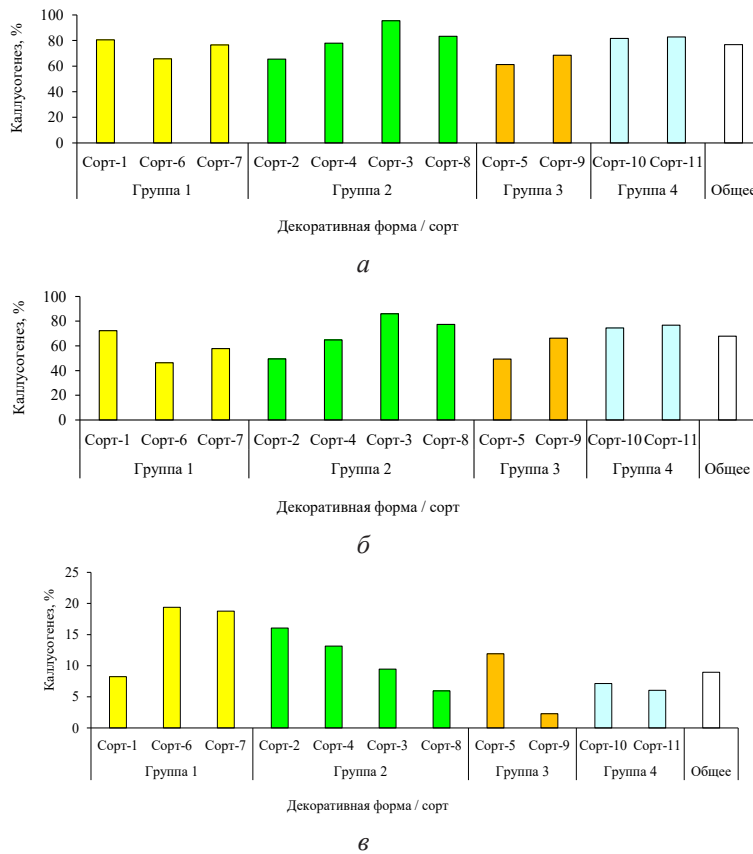


Рис. 1. Сравнение средних значений активности каллусогенеза на черенках туи западной: а – фототрансформирующее укрытие; б – обычный спанбонд; в – разность значений показателя (прирост величин)

Fig. 1. The comparison of the average values of callusogenesis activity on the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings: а – photo-transforming shelter; б – unmodified spunbond; в – the difference between the indicator values (the increase in the values)

Сопоставление этого показателя регенерационной способности у разных форм туи позволяет признать его некоторое повышение у сорта Woodwardii, имеющего шаровидную форму кроны и зеленую окраску хвои. Его значения составили: $95,45 \pm 2,47$ % (ФС) и $86,00 \pm 6,47$ % (ОС), что сформировало превышение первого над вторым на 9,45 %, или в 1,11 раза. Обобщенное для массива данных в варианте ФС значение составило $76,81 \pm 1,61$ %; в варианте ОС – $67,59 \pm 2,05$ %, превышение – 9,22 %, или 1,14 раза. Оно сформировалось на фоне единого обобщенного для всего массива данных среднего значения, которое достигло $72,41 \pm 1,31$ %. Расчетный коэффициент вариации ($C_v = 35,82$ %) позволил рассматривать изменчивость как соответствующую высокому уровню по шкале Мамаева ($C_v = 36 \dots 50$ %).

Не менее значимая характеристика регенерационной способности черенков – количество образовавшихся на них придаточных корней – также варьировала по декоративным формам и сортам туи западной и испытывала неодинаковое влияние разных по своим оптическим характеристикам укрывных материалов (ФС и ОС), что представлено на рис. 2.

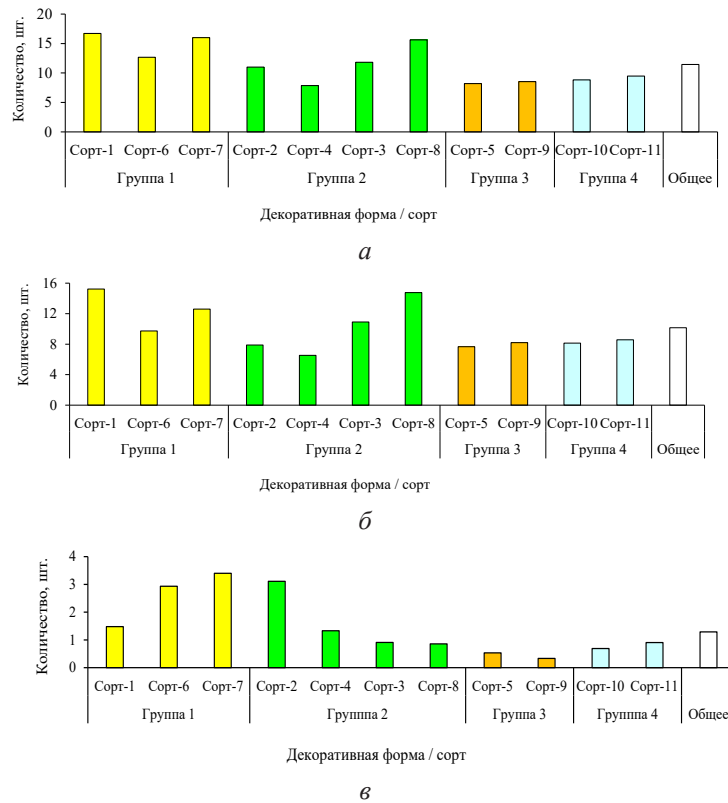


Рис. 2. Сравнение среднего количества придаточных корней на черенках туи западной: *a* – фототрансформирующее укрытие; *б* – обычный спанбонд; *в* – разность значений показателя (прирост величин)

Fig. 2. The comparison of the average values of the number of adventitious roots on the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings: *a* – photo-transforming shelter; *б* – unmodified spunbond; *в* – the difference between the indicator values (the increase in the values)

Наивысшие средние значения данного показателя в варианте ФС зафиксированы у Rheingold – $16,71 \pm 0,59$ шт.; Golden Globe – $16,00 \pm 0,62$ шт.; Danica – $15,62 \pm 0,60$ шт. В варианте ОС заметно выделялись на фоне других Rheingold – $15,23 \pm 1,67$ шт. и Danica – $14,76 \pm 1,12$ % шт. Следовательно, указанные декоративные формы и сорта устойчиво (в той или иной мере) занимали лидирующие позиции среди остальных по ризогенезу. Наибольший показатель в варианте ФС в этом случае превосходил максимум контрольного варианта (ОС) на 1,48 шт., или в 1,10 раза. Превышение обобщенных по вариантам опыта значений ($11,44 \pm 0,34$ и $9,64 \pm 0,43$ шт. – для ФС и ОС соответственно) составило 1,81 шт., или 1,19 раза. При этом обобщенное по 2 типам укрытия среднее значение равнялось $10,58 \pm 0,27$ шт., а коэффициент вариации ($Cv = 51,27$ %) в этом случае оценил изменчивость как очень высокую ($Cv > 50$ %).

Реакция показателей пострегенеративного развития придаточных корней на применение разных типов укрывного материала проявилась неодинаково. По длине лидирующего корня различия отчетливо наблюдались как между сравниваемыми формами и сортами, так и между вариантами ФС и ОС (рис. 3).

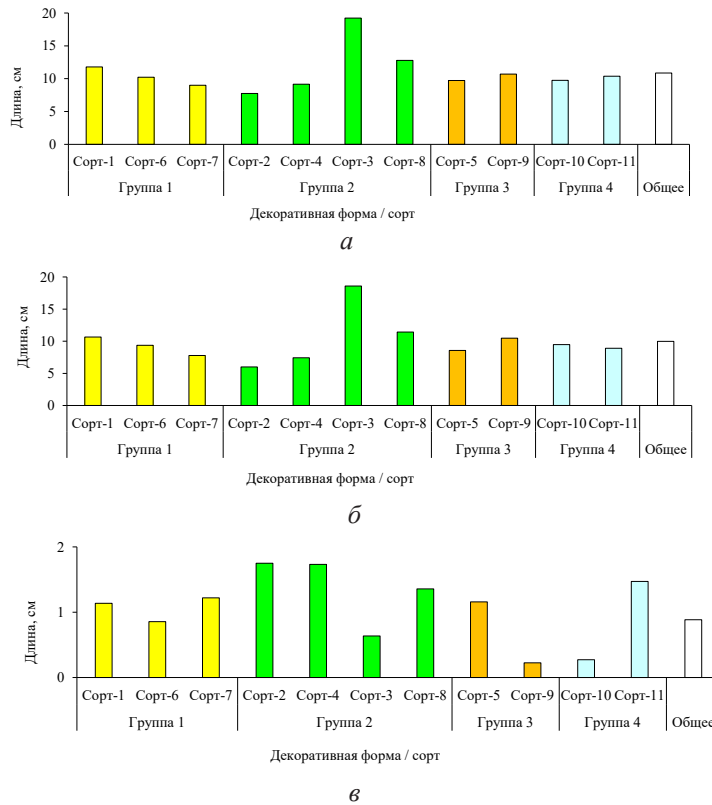


Рис. 3. Сравнение средних длин лидирующего корня черенков туи западной: *a* – фототрансформирующее укрытие; *б* – обычный спанбонд; *в* – разность значений показателя (прирост величин)

Fig. 3. The comparison of the average values of the length of the leading root of the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings: *a* – photo-transforming shelter; *б* – unmodified spunbond; *в* – the difference between the indicator values (the increase in the values)

Наибольшие значения показатель приобретает у сортов Woodwardii и Danica: в варианте ФС – $19,23 \pm 0,96$ и $12,79 \pm 0,49$ см; в варианте ОС – $18,59 \pm 1,02$ и $11,43 \pm 0,44$ см соответственно. Несмотря на незначительные расхождения значений, в варианте с ФС отмечено некоторое возрастание показателя: на 0,64 см, или в 1,03 раза (сорт-3); на 1,36 см, или в 1,12 раза (сорт-8). Обобщенные по вариантам укрытий значения достигли $10,86 \pm 0,31$ (ФС) и $9,88 \pm 0,33$ (ОС) см, что сформировало превышение в варианте с ФС на 0,99 см, или в 1,10 раза. Среднее значение для объединенного по всем вариантам опыта массива составило $10,39 \pm 0,23$ см, а коэффициент вариации ($C_v = 43,46\%$) определил изменчивость как высокую ($C_v = 36...50\%$).

Наиболее информативный показатель развития корневых систем – их общая суммарная протяженность – оказался достаточно восприимчивым к изменению условий освещенности, которое вызывалось введением в схему опыта ФС (рис. 4).

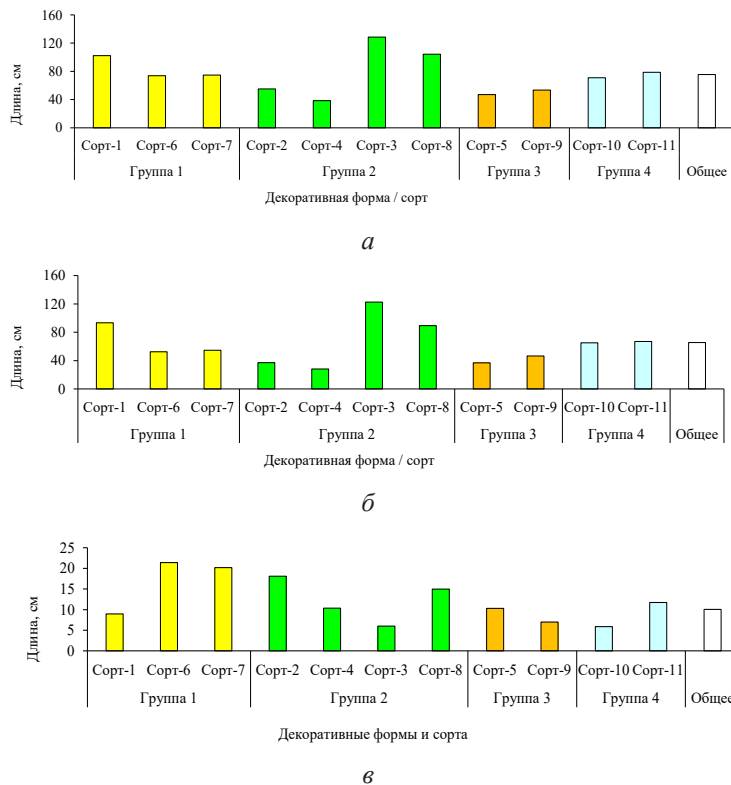


Рис. 4. Сравнение средних значений суммарной протяженности корневых систем на черенках туи западной: *a* – фототрансформирующее укрытие; *б* – обычный спанбонд; *в* – разность значений показателя (прирост величин)

Fig. 4. The comparison of the average values of the total length of the root system on the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) cuttings: *a* – photo-transforming shelter; *б* – unmodified spunbond; *в* – the difference between the indicator values (the increase in the values)

Лучшие результаты по данному показателю в целом продемонстрировали те же декоративные формы и сорта туи западной, что и по длине осевого корня: Rheingold, Woodwardii и Danica. Для них в варианте ФС соответственно за-

фиксированы значения: $102,29 \pm 5,75$; $128,59 \pm 7,93$ и $104,30 \pm 4,27$ см. В варианте ОС – $93,33 \pm 14,26$; $122,59 \pm 17,92$ и $89,33 \pm 8,66$ см. Как и по ранее проанализированным показателям, в данном случае также наблюдался слабый положительный эффект применения ФС: по сорту Rheingold – на 8,95 см, или в 1,10 раза; по Woodwardii – на 6,00 см, или в 1,05 раза, и по Danica – на 14,97 см, или в 1,17 раза. Превышение обобщенных средних значений по каждому из вариантов составило 10,96 см, или 1,17 раза. Однако увеличение показателя по сортам с общим меньшим средним значением признака было заметно более ощутимым и равнялось: у сорта Golden Globe – 62,02 см, или 5,87 раза; у Mirjam – 21,40 см, или 1,41 раза; у Mr. Bowing Boll – на 18,09 см, или 1,49 раза. Такая картина сложилась на фоне обобщенной для всех вариантов и повторностей опыта оценки: $70,29 \pm 2,29$ см. Коэффициент вариации, полученный для данного случая ($Cv = 64,63 \%$), говорит об очень высоком уровне изменчивости ($Cv > 50 \%$). Таким образом, показатели пострегенеративного развития надземной части черенков в своих реакциях на применение укрывных материалов с разными оптическими свойствами, как и другие характеристики, рассматриваемые в данном опыте, были неодинаковы.

Зафиксированная фенотипическая неоднородность показателей сравниваемых форм и сортов проявилась на выровненном фоне экологических условий (параметры среды в каждом отдельном вегетационном сооружении абсолютно идентичны), что дало основание признать различия обусловленными внутренними особенностями самих растений, определяемыми спецификой их генотипа. Подтверждение этому было получено в ходе выполнения однофакторного дисперсионного анализа по показателям регенерационной способности черенков и пострегенерационного развития их корневых систем и надземной части (табл. 3). Анализ позволил оценить масштаб влияния различий в происхождении черенкового материала (принадлежность к той или иной декоративной форме или сорту) на формирование общего фона фенотипической дисперсии.

Из данных табл. 3 следует, что по всем показателям регенерационной способности исследуемых декоративных форм и сортов туи западной различия были существенными – опытные критерии Фишера значительно превышали соответствующие табличные величины для заданного числа степеней свободы как на 5%-м, так и на 1%-м уровнях значимости, принимая значения от 3,35 (признак 1) до 17,35 (признак 2). В такой ситуации дисперсионный анализ уверенно опроверг нулевую гипотезу о том, что различий между представителями рассматриваемых видов и декоративных форм в варианте укоренения черенков с использованием ФС не существует. Это позволило продолжить проведение анализа в части вычисления доли влияния организованного фактора (в нашем случае – эндогенная специфика регенерационной способности биологических образцов, обусловленная принадлежностью к сорту) на формирование общей фенотипической дисперсии. В расчетах по алгоритму Плохинского значения показателя составили от $14,72 \pm 4,40 \%$ ($F_h^2 = 3,35$; $F_{05/01} = 1,88/2,41$) по признаку 1 до $47,22 \pm 2,24 \%$ ($F_h^2 = 3,71$; $F_{05/01} = 1,88/2,41$) по признаку 2. Вычисление тех же значений по алгоритму Снедекора дало вполне сопоставимый результат.

Таблица 3

Существенность различий между формами и сортами туи западной по показателям регенерационной способности черенков при их укоренении под светотрансформирующим и обычным укрытием (по данным однофакторного дисперсионного анализа)

The significance of the differences between the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) forms and varieties in terms of the indicators of regenerative ability of the cuttings rooted under the photo-transforming and the unmodified shelter (according to one-way analysis of variance)

Показатель	F _{оп}	Доля влияния фактора (h ² ±s _h ²)						Критерии различий	
		по Плохинскому			по Снедекору				
		h ²	±s _h ²	F _h ²	h ²	±s _h ²	F _h ²	HCP ₀₅	D ₀₅
<i>ФС</i>									
1	3,35	0,1472	0,0440	3,3487	0,1134	0,0457	2,4818	14,275	24,470
2	17,35	0,4722	0,0272	17,3547	0,4711	0,0273	17,2811	2,379	4,079
3	7,38	0,2756	0,0373	7,3822	0,2579	0,0383	6,7437	2,561	4,390
4	13,14	0,4039	0,0307	13,1443	0,3981	0,0310	12,8322	20,487	35,119
5	13,54	0,4111	0,0304	13,5426	0,4059	0,0306	13,2530	1,247	2,138
6	13,11	0,4032	0,0308	13,1066	0,3974	0,0311	12,7924	19,014	32,594
7	10,82	0,3581	0,0331	10,8208	0,3485	0,0336	10,3771	1,466	2,512
8	9,43	0,3270	0,0347	9,4278	0,3146	0,0353	8,9052	0,056	0,097
9	9,43	0,3270	0,0347	9,4278	0,3146	0,0353	8,9052	0,056	0,097
10	4,53	0,1894	0,0418	4,5314	0,1613	0,0432	3,7315	0,474	0,813
11	4,93	0,2028	0,0411	4,9348	0,1765	0,0424	4,1577	0,346	0,593
12	12,02	0,3825	0,0318	12,0166	0,3750	0,0322	11,6406	1,488	2,551
13	14,52	0,4280	0,0295	14,5150	0,4240	0,0297	14,2806	0,413	0,708
14	5,85	0,2346	0,0401	5,8542	0,2120	0,0413	5,1381	0,978	1,677
<i>ОС</i>									
1	4,42	0,2007	0,0454	4,4183	0,1697	0,0472	3,5980	17,643	30,243
2	8,93	0,3366	0,0377	8,9315	0,3217	0,0385	8,3486	3,341	5,727
3	9,46	0,3496	0,0370	9,4611	0,3360	0,0377	8,9060	2,556	4,382
4	6,77	0,2778	0,0410	6,7709	0,2566	0,0422	6,0743	30,244	51,844
5	9,15	0,3421	0,0374	9,1534	0,3278	0,0382	8,5821	1,609	2,759
6	6,35	0,2651	0,0418	6,3481	0,2423	0,0430	5,6293	28,697	49,192
7	8,15	0,3165	0,0388	8,1483	0,2995	0,0398	7,5241	1,734	2,972
8	7,00	0,2847	0,0406	7,0049	0,2642	0,0418	6,3206	0,089	0,153
9	7,00	0,2847	0,0406	7,0049	0,2642	0,0418	6,3206	0,089	0,153
10	3,13	0,1509	0,0482	3,1277	0,1129	0,0504	2,2396	0,653	1,119
11	5,61	0,2418	0,0431	5,6143	0,2163	0,0445	4,8569	0,341	0,584
12	19,92	0,5309	0,0267	19,9157	0,5308	0,0267	19,9102	1,172	2,010
13	6,80	0,2787	0,0410	6,7998	0,2575	0,0422	6,1047	0,399	0,685
14	2,72	0,1337	0,0492	2,7173	0,0931	0,0515	1,8076	1,178	2,020

Примечание: F_{оп} – опытное значение критерия Фишера; F₀₅, F₀₁ – табличное значение критерия Фишера на 5%-м (F₀₅ = 1,88) и 1%-м уровнях значимости (F₀₁ = 2,41) соответственно; h² – доля влияния организованного фактора; ±s_h² – ошибка доли влияния организованного фактора; F_h² – критерий Фишера в оценке достоверности доли влияния организованного фактора; HCP₀₅ – наименьшая существенная разность на 5%-м уровне значимости; D₀₅ – критерий Тьюки на 5%-м уровне значимости.

Дисперсионный анализ по той же схеме для вегетационных сооружений с укрытием из ОС сохранил в основных чертах соотношение данных, полученных при дисперсионном анализе для вегетационных сооружений с ФС (табл. 3). Можно констатировать, что по всем показателям регенерационной способности декоративных форм и сортов различия между ними существенны. Данное утверждение обосновано зафиксированным превышением расчетными F-критериями соответствующих им табличных пределов для принятых в опыте уровней точности (5%-й и 1%-й) и заданного числа степеней свободы. Вычисление силы влияния организованного фактора по тестируемым признакам обнаружило, что наибольшие значения свойственны признаку 12: $53,09 \pm 2,67$ % ($F_h^2 = 19,92$; $F_{05/01} = 1,88/2,41$), а наименьшие – признаку 14: $13,37 \pm 4,92$ % ($F_h^2 = 2,72$; $F_{05/01} = 1,88/2,41$). В итоге указанные величины свидетельствуют о выраженных различиях между формами и сортами по линейным параметрам надземной части черенков при весьма стабильном отношении высоты к диаметру, что вполне характерно для большинства хвойных видов, к числу которых относится и туя западная.

Эффективность применения ФС и ОС при укоренении черенков декоративных форм и сортов туи западной позволил охарактеризовать двухфакторный дисперсионный анализ (табл. 4). При этом факторная структура дисперсионного комплекса предусматривала возможность дифференцированного учета влияния различий в технологических аспектах укоренения (фактор А), что рассматривалось как испытание разных по оптико-физическим свойствам укрывных материалов – ФС и ОС, а также различий, обусловленных принадлежностью испытываемых растений к сравниваемым декоративным формам и сортам (фактор В). Принятая организационно-методическая схема опыта дала возможность не только вскрыть силу влияния каждого из его организованных факторов отдельно, но и оценить их консолидированный импакт-эффект во взаимодействии (фактор АВ).

Влияние различий между оптическими свойствами укрывных материалов в соответствии с критериями Фишера в подавляющем числе показателей (10 из 14) является существенным, однако у некоторой их части (признаки 5, 10–12) оно незначительно (табл. 4). В тех случаях, когда эффективность действия указанного фактора получала подтверждение (F-критерии превысили предельно допустимый порог), максимум оценок ($6,04 \pm 0,25$ %) соответствовал признакам 8 и 9 – их доля возросла, а минимум ($0,78 \pm 0,27$ %) – признаку 7. Следует отметить, что последний показатель статистически достоверен на 5%-м уровне значимости и недостоверен на 1%-м. Хорошо заметный на фоне проявления по другим признакам достоверный эффект зафиксирован по признаку 2: $5,68 \pm 0,25$ %. По остальным показателям регенерационной способности черенков, по которым существенность различий была подтверждена, эффект замены ОС на ФС выразился в статистически достоверном изменении их значений как в большую (признаки 1–4, 6–8, 13), так и в меньшую (признак 9) или в ту и другую (признак 14) стороны. В отдельных случаях (признаки 5, 10–12), как было отмечено ранее, статистически достоверного изменения показателей не произошло. Приведенные результаты, полученные на основе расчетного алгоритма Плохинского, сопоставимы с достигнутыми в вычислениях по алгоритму Снедекора.

Таблица 4

Эффективность применения различных типов укрывного материала при укоренении черенков декоративных форм и сортов туи западной (по данным двухфакторного дисперсионного анализа)

The effectiveness of the use of different types of covering materials in rooting the cuttings of the northern white-cedar (*Thuja occidentalis* L.) ornamental forms and varieties (according to two-way analysis of variance)

Показатель	Источник дисперсии, фактор влияния	F _{он}	Доля влияния фактора (h ² ±s _h ²)			
			по Плохинскому		по Снедекору	
			h ²	±s _h ²	h ²	±s _h ²
1	A	18,08	0,0389	0,0026	0,0700	0,0025
	B	6,48	0,1394	0,0233	0,1235	0,0237
	AB	1,19	0,0256	0,0263	0,0086	0,0268
	Z	–	0,7961	0,2039	0,7978	0,2022
2	A	35,76	0,0568	0,0025	0,0944	0,0024
	B	16,52	0,2623	0,0199	0,2317	0,0208
	AB	5,88	0,0934	0,0245	0,1458	0,0231
	Z	–	0,5876	0,4124	0,5281	0,4719
3	A	7,03	0,0129	0,0027	0,0218	0,0026
	B	16,39	0,3016	0,0189	0,3055	0,0188
	AB	0,26	0,0048	0,0269	–0,0294	0,0278
	Z	–	0,6808	0,3192	0,7021	0,2979
4	A	13,62	0,0244	0,0026	0,0429	0,0026
	B	16,29	0,2913	0,0192	0,2858	0,0193
	AB	1,27	0,0227	0,0264	0,0100	0,0268
	Z	–	0,6617	0,3383	0,6613	0,3387
5	A	3,11	0,0053	0,0027	0,0070	0,0027
	B	21,79	0,3681	0,0171	0,3799	0,0168
	AB	0,09	0,0016	0,0270	–0,0332	0,0279
	Z	–	0,6251	0,3749	0,6463	0,3537
6	A	13,38	0,0243	0,0026	0,0426	0,0026
	B	15,43	0,2799	0,0195	0,2733	0,0196
	AB	1,38	0,0250	0,0264	0,0142	0,0266
	Z	–	0,6709	0,3291	0,6698	0,3302
7	A	4,38	0,0078	0,0027	0,0119	0,0027
	B	18,33	0,3273	0,0182	0,3346	0,0180
	AB	0,24	0,0043	0,0269	–0,0293	0,0278
	Z	–	0,6606	0,3394	0,6828	0,3172
8	A	33,22	0,0604	0,0025	0,1011	0,0024
	B	9,62	0,1749	0,0223	0,1488	0,0230
	AB	5,05	0,0919	0,0245	0,1398	0,0232
	Z	–	0,6728	0,3272	0,6103	0,3897

Окончание табл. 4

Показатель	Источник дисперсии, фактор влияния	F _{оп}	Доля влияния фактора (h ² ±s _h ²)			
			по Плохинскому		по Снедекору	
			h ²	±s _h ²	h ²	±s _h ²
9	A	33,22	0,0604	0,0025	0,1011	0,0024
	B	9,62	0,1749	0,0223	0,1488	0,0230
	AB	5,05	0,0919	0,0245	0,1398	0,0232
	Z	–	0,6728	0,3272	0,6103	0,3897
10	A	0,05	0,0001	0,0027	–0,0042	0,0027
	B	6,24	0,1405	0,0232	0,1286	0,0236
	AB	1,14	0,0257	0,0263	0,0068	0,0268
	Z	–	0,8337	0,1663	0,8688	0,1312
11	A	3,59	0,0075	0,0027	0,0105	0,0027
	B	8,62	0,1808	0,0221	0,1698	0,0224
	AB	1,71	0,0359	0,0261	0,0317	0,0262
	Z	–	0,7758	0,2242	0,7880	0,2120
12	A	3,23	0,0049	0,0027	0,0065	0,0027
	B	28,33	0,4270	0,0155	0,4372	0,0152
	AB	0,70	0,0106	0,0267	–0,0094	0,0273
	Z	–	0,5575	0,4425	0,5657	0,4343
13	A	20,77	0,0338	0,0026	0,0598	0,0025
	B	20,54	0,3343	0,0180	0,3248	0,0182
	AB	1,83	0,0298	0,0262	0,0275	0,0263
	Z	–	0,6021	0,3979	0,5879	0,4121
14	A	9,85	0,0205	0,0026	0,0356	0,0026
	B	8,72	0,1818	0,0221	0,1708	0,0224
	AB	1,25	0,0260	0,0263	0,0109	0,0267
	Z	–	0,7717	0,2283	0,7827	0,2173

Примечание: Z – неорганизованный фактор, или остаточная дисперсия, соответствующая внутригрупповой (случайной) изменчивости, индуцируемой пестротой фона не учитываемых в опыте факторов среды. Для факторов A, B и AB F_{05/01} равняется соответственно 3,86/6,70; 1,85/2,37 и 1,85/2,37.

Материалы табл. 4 позволяют сделать заключение о высокой наследственной обусловленности различий между декоративными формами и сортами туи западной по показателям их регенерационной способности. Опытные критерии Фишера по фактору B для всех анализируемых признаков превосходят допустимые табличные значения. Однако влияние данного фактора на формирование общего фона фенотипической дисперсии по показателям регенерационной способности и пострегенерационного развития корневых систем и надземной части черенков туи западной неодинаково, и доля вызываемой ими дисперсии в расчетах по алгоритму Плохинского составила от 13,94±2,33 % (признак 1) и 14,05±2,32 % (признак 10) до 42,70±1,55 % (признак 12). По показателям 5, 7 и 13 значения составили: 36,81±1,71; 32,73±1,82 и 33,43±1,80 % соответственно.

Взаимодействие названных факторов, рассматриваемое как самостоятельный эффект влияния, в большинстве случаев демонстрировало малозаметное по сравнению с влиянием различий в свойствах укрывных материалов и тем более специфики наследственной природы сравниваемых форм и сортов воздействие на общий фон фенотипической изменчивости (табл. 4). По 11 показателям регенерационной способности черенков из 14 в данном дисперсионном анализе статистическая значимость эффекта взаимодействия как фактора влияния на общий фон дисперсии в целом не нашла подтверждения. В случаях, когда эффективность действия фактора АВ получала статистическое подтверждение, значения были достаточно выровнены: по признаку 2 – $9,34 \pm 2,45$ %; по признаку 8 – $9,19 \pm 2,45$ % и по признаку 9 – $9,19 \pm 2,45$ %. Для этих признаков существенность различий по фактору АВ получила подтверждение как на 5%-м, так и на 1%-м уровнях значимости. Влияние не учитываемых в опыте случайных факторов, формирующих так называемую остаточную дисперсию, которую традиционно связывают с неизбежной пестротой фоновых условий среды, доминировало и, превышая 50%-й рубеж, составило от 58,76 % (признак 2) и 55,75 % (признак 12) до 83,37 % (признак 10).

Выводы

1. Применение в качестве укрывных материалов для вегетационных сооружений модифицированного спанбонда с интегрированием в его структуру оксисульфида иттрия, легированного европием (Y_2O_3SEu), дает положительный эффект при укоренении черенков туи западной и вызывает увеличение ряда показателей регенерационной способности и пострегенерационного развития корневых систем и надземной части, таких как активность каллусогенеза, количество сформировавшихся придаточных корней, длина лидирующего корня, суммарная протяженность корневых систем, высота надземной части и диаметр корневой шейки.

2. Высокая чувствительность тестируемых показателей укоренения и последующего развития черенков туи западной к не учитываемым в опыте случайным факторам, влияние которых обусловлено пестротой фоновых условий среды, в значительной мере нивелировала возникающие в дисперсионных комплексах различия как между представителями сравниваемых декоративных форм и сортов, так и между вариантами применения неодинаковых по оптическим характеристикам укрывных материалов для вегетационных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Котынова М.Ю. Сезонный характер содержания пигментов в хвое туи западной в условиях Нижегородской области // Тр. СПбНИИЛХ. 2022. № 3. С. 38–58.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Kotynova M.Yu. Seasonal Character of the Pigment Content in the Needles of Northern White-Cedar in the Conditions of the Nizhny Novgorod Region. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva* =

Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2022, no. 3, pp. 38–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2022.3.38>

2. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Ханявин А.И., Акулинина М.А. Параметры шишек декоративных форм и сортов туи в условиях Нижегородского Поволжья при интродукции // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. материалов XVII Междунар. науч.-практ. конф., Барнаул, 9–10 февр. 2022 г.: в 2 кн. Кн. 1. Барнаул: Алтайск. ГАУ, 2022. С. 323–325.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Khanyavin A.I., Akulinina M.A. Parameters of Cones of Decorative Forms and Varieties of Thuja in the Conditions of the Nizhny Novgorod Volga Region during Introduction. *Agrarian Science to Agriculture: Collection of Materials in 2 Books. XVII International Scientific and Practical Conference* (Barnaul, February 9–10, 2022). Barnaul, the Altai State Agricultural University Publ., 2022, book 1, pp. 323–325. (In Russ.).

3. Иваницкий А.Е., Райда В.С., Минич А.С., Ивлев Г.А. Исследование свойств фотолюминесцентных пленок при возбуждении солнечным излучением // Вестн. ТГПУ. 2011. Вып. 8(110). С. 119–123.

Ivanitskiy A.E., Raida V.S., Minich A.S., Ivlev G.A. Research Properties of Photoluminescent Films at Excitation by a Solar Radiation. *Vestnik Tomskogo pedagogicheskogo universiteta* = Tomsk State Pedagogical University Bulletin, 2011, iss. 8(110), pp. 119–123. (In Russ.).

4. Карасев В.Е. Полисветаны – полимерные светотрансформирующие материалы для сельского хозяйства // Вестн. ДВО РАН. 1995. № 2. С. 66–73.

Karasev V.E. Polysvetans – Polymer Light-Transforming Materials for Agriculture. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoy akademii nauk* = Vestnik of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1995, no. 2, pp. 66–73. (In Russ.).

5. Котынова М.Ю., Бессчетнов В.П. Регенерационная способность представителей рода туя при укоренении черенков в теплицах // Современное лесное хозяйство – проблемы и перспективы: материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию ВНИИЛГИСБиотех, Воронеж, 3–4 дек. 2020 г. Воронеж: Истоки, 2020. С. 40–43.

Kotynova M.Yu., Besschetnov V.P. Regenerative Ability of Representatives of the Genus Thuja When Rooting the Cuttings in Greenhouses. *Modern Forestry – Problems and Prospects: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the All-Russian Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology* (Voronezh, December 3–4, 2020). Voronezh, Istoki Publ., 2020, pp. 40–43. (In Russ.).

6. Котынова М.Ю., Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н. Укоренение черенков декоративных форм туи западной (*Thuja occidentalis* L.) в теплицах // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф., Вологда, 1 дек. 2020 г. / отв. ред. С.М. Хамитова. Вологда: ВоГУ, 2020. С. 147–149.

Kotynova M.Yu., Besschetnov V.P., Besschetnova N.N. Rooting the Cuttings of Ornamental Forms of the Northern White-Cedar (*Thuja occidentalis* L.) in Greenhouses. *Actual Problems of the Development of the Forest Complex: Materials of XVIII International Scientific and Technical Conference* (Vologda, December 1, 2020). Ed.-in-chief S.M. Khamitova. Vologda, Vologda State University Publ., 2020, pp. 147–149. (In Russ.).

7. Ляховенко О.И., Чулков Д.И. Основные экологические проблемы российских городов и стратегия их разрешения // Рус. политология – Russian political science. 2017. № 3(4). С. 21–26.

Lyakhovenko O.I., Chulkov D.I. The Main Environmental Problems of the Russian Cities and the Strategy for Their Resolution. *Russkaya politologiya* = Russian Political Science, 2017, no. 3(4), pp. 21–26. (In Russ.).

8. Минич А.С., Минич И.Б., Зеленчукова Н.С., Карначук Р.А., Головацкая И.Ф., Ефимова М.В., Райда В.С. Роль красного люминесцентного излучения низкой интенсивности в регуляции морфогенеза и гормонального баланса *Arabidopsis thaliana* // Физиология растений. 2006. Т. 53, № 6. С. 863–868.

Minich A.S., Minich I.B., Zelen'chukova N.S., Karnachuk R.A., Golovatskaya I.F., Efimova M.V., Rajda V.S. The Role of Low Intensity Red Luminescent Radiation in the Control of *Arabidopsis thaliana* Morphogenesis and Hormonal Balance. *Fiziologiya Rasteniy* = Russian Journal of Plant Physiology, 2006, vol. 53, no. 6, pp. 863–868. (In Russ.).

9. Храмов Р.Н., Бессчетнов В.П., Бессчетнова Н.Н., Гаврилова А.А. Нанокompозитные светотрансформирующие укрывные материалы в лесном и сельском хозяйстве // Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение: тр. II Рос.-белорус. науч.-техн. конф. им. О.В. Лосева, посвящ. 70-летию Победы в Велик. Отечеств. войне, 70-летию образования РНТОРЭС им. А.С. Попова, Всемир. Году Света, Н. Новгород, 17–19 нояб. 2015 г. Н. Новгород: ННГУ, 2015. С. 325–328.

Khramov R.N., Besschetnov V.P., Besschetnova N.N., GavriloVA A.A. Nanocomposite Light-Transforming Covering Materials in Forestry and Agriculture. *The Element Base of Domestic Radio Electronics: Import Substitution and Application: Proceedings of the II Russian-Belarusian Scientific and Technical Conference named after O.V. Losev., Dedicated to the 70th Anniversary of the Victory in the Great Patriotic War, the 70th anniversary of the RSTSREEC named after A.S. Popov and the International Year of Light (Nizhny Novgorod, November 17–19, 2015)*. Nizhny Novgorod, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod Publ., 2015, pp. 325–328. (In Russ.).

10. Щелокоев Р.Н. Полисветаны и полисветановый эффект // Изв. АН СССР. 1986. № 10. С. 50–55.

Shchelokov R.N. Polysvetans and Polysvetan Effects. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1986, no. 10, pp. 50–55. (In Russ.).

11. Bassman J.H., Edwards G.E., Robberecht R. Long-Term Exposure to Enhanced UV-B Radiation is not Detrimental to Growth and Photosynthesis in Douglas-Fir. *New Phytologist*, 2002, vol. 154, iss. 1, pp. 107–120. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00354.x>

12. Beardmore T.A., Loo J., McAfee B., Malouin C., Simpson D. A Survey of Tree Species of Concern in Canada: the Role for Genetic Conservation. *The Forestry Chronicle*, 2006, vol. 82, no. 3, pp. 351–363. <https://doi.org/10.5558/tfc82351-3>

13. Brown C.S., Schuerger A.C., Sager J.C. Growth and Photomorphogenesis of Pepper Plants under Red Light-Emitting Diodes with Supplemental Blue or Far-Red Lighting. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1995, vol. 120, iss. 5, pp. 808–813. <https://doi.org/10.21273/JASHS.120.5.808>

14. Brown R.P. Polymers in Agriculture and Horticulture. *RAPRA Review Reports*, 2004, vol. 15, no. 2, pp. 1–103.

15. Dean A., Voss D., Draguljić D. *Design and Analysis of Experiments (Springer Texts in Statistics)*. 2nd ed., kindle ed. Germany, Heidelberg, Springer-Verlag GmbH, 2017. 865 p.

16. Delprato M.L., Krapp A.R., Carillo N. Green Light to Plant Responses to Pathogens: The Role of Chloroplast Light-Dependent Signaling in Biotic Stress. *Photochemistry and Photobiology*, 2015, vol. 91, iss. 5, pp. 1004–1011. <https://doi.org/10.1111/php.12466>

17. Edser C. Light Manipulating Additives Extend Opportunities for Agricultural Plastic Films. *Plastics, Additives and Compounding*, 2002, vol. 4, iss. 3, pp. 20–24. [https://doi.org/10.1016/S1464-391X\(02\)80079-4](https://doi.org/10.1016/S1464-391X(02)80079-4)

18. Espi E., Salmerón A., Fontecha A., García-Alonso Y., Real A.I. New Ultrathermic Films for Greenhouse Covers. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 2006, vol. 22, iss. 1, pp. 59–68. <https://doi.org/10.1177/8756087906062764>
19. Espi E., Salmerón A., Fontecha A., García-Alonso Y., Real A.I. Plastic Films for Agricultural Applications. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, 2006, vol. 22, iss. 2, pp. 85–102. <https://doi.org/10.1177/8756087906064220>
20. Fowler D.P. Western Red Cedar (*Thuja plicata* Donn) in Nova Scotia. *The Forestry Chronicle*, 1981, vol. 57, no. 3, pp. 124–125. <https://doi.org/10.5558/tfc57124-3>
21. García-Alonso Y., Espi E., Salmerón A., Fontecha A., Gonzalez A. Viral Diseases Control with UV-Blocking Films in Greenhouses of Southern Spain. *Acta Horticulturae* 659, 2004, vol. 659, pp. 331–338. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.659.43>
22. González A., Rodríguez R., Bañón S., Franco J.A., Fernández J.A. The Influence of Photoselective Plastic Films as Greenhouse Cover on Sweet Pepper Yield and on Insect Pest Levels. *Acta Horticulturae* 559, 2001, vol. 559, pp. 233–238. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.559.34>
23. Grossnickle S.C., Russel J.H. Yellow-Cedar and Western Redcedar Ecophysiological Response to Fall, Winter and Early Spring Temperature Conditions. *Annals of Forest Science*, 2006, vol. 63, no. 1, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1051/forest:2005092>
24. Guo Y., Tan J. Recent Advances in the Application of Chlorophyll a Fluorescence from Photosystem II. *Photochemistry and Photobiology*, 2015, vol. 91, iss. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1111/php.12362>
25. Khramov R.N., Kreslavski V.D., Svidchenko E.A., Surin N.M., Kosobryukhov A.A. Influence of Photoluminophore-Modified Agro Textile Spunbond on Growth and Photosynthesis of Cabbage and Lettuce Plants. *Optics Express*, 2019, vol. 27, iss. 2, pp. 31967–31977. <https://doi.org/10.1364/OE.27.031967>
26. Khramov R., Martynova N., Besschetnova N., Besschetnov V., Luponosov Yu. The Effectiveness of Agrotexile Cover with Organic Photoluminophore in Rooting Cuttings of Hungarian Lilac (*Syringa josikaea* J. Jacq. ex Rchb.). *BIO Web of Conferences*, 2022, vol. 42, art. no. 01017. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224201017>
27. Lichtenhaller H.K. Biosynthesis and Accumulation of Isoprenoid Carotenoids and Chlorophylls and Emission of Isoprene by Leaf Chloroplasts. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 2009, vol. 3, no. 3, pp. 81–94.
28. Linder S., Troeng E. Photosynthesis and Transpiration of 20-Year-Old Scots Pine. *Ecological Bulletins*, 1980, no. 32, pp. 165–181.
29. Losi A., Mandalari C., Gärtner W. The Evolution and Functional Role of Flavin-Based Prokaryotic Photoreceptors. *Photochemistry and Photobiology*, 2015, vol. 91, iss. 5, pp. 1021–1031. <https://doi.org/10.1111/php.12489>
30. Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. 2nd. ed. New Jersey, Hoboken, Wiley-Interscience, 2003. 760 p.
31. Mead R., Curnow R.N., Hasted A.M. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. 3rd. ed. New York, Chapman and Hall/CRC, 2002. 488 p.
32. Max J.F.J., Schurr U., Tantau H.-J., Mutwiwa U.N., Hofmann T., Ulbrich A. Greenhouse Cover Technology. *Horticultural Reviews*, 2012, vol. 40, chapt. 7, pp. 259–396.
33. Noland T.L., Man R., Irvine M. Determining the Glyphosate Tolerance of Eastern White Cedar: First Year Post-Treatment Results. *The Forestry Chronicle*, 2015, vol. 91, no. 2, pp. 182–186. <https://doi.org/10.5558/tfc2015-029>

34. Pedlar J.H., McKenney D.W., Allen D., Lawrence K., Lawrence G., Campbell K. A Street Tree Survey for Canadian Communities: Protocol and Early Results. *The Forestry Chronicle*, 2013, vol. 89, no. 6, pp. 753–758. <https://doi.org/10.5558/tfc2013-137>
35. Scarratt J.B. Greenhouse Managers: Beware Combustion Fumes in Container Greenhouses. *The Forestry Chronicle*, 1985, vol. 61, no. 4, pp. 308–311. <https://doi.org/10.5558/tfc61308-4>
36. Schoefs B., Franck F. Chlorophyll Synthesis in Dark-Grown Pine Primary Needles. *Plant Physiology*, 1998, vol. 118, iss. 4, pp. 1159–1168. <https://doi.org/10.1104/pp.118.4.1159>
37. Semida W.M., Hadley P., Sobeih W., El-Saeah N.A., Barakat M.A.S. The Influence of Thermic Plastic Films on Vegetative and Reproductive Growth of Iceberg Lettuce ‘Dublin’. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*, 2013, vol. 7, no. 7, pp. 611–616.
38. Srinagesh K. *The Principles of Experimental Research*. 1st ed. United States, Massachusetts, Waltham, Butterworth-Heinemann, 2005. 432 p.
39. Thorpe T.A. Application of Tissue Culture Technology to Forest Tree Improvement. *The Forestry Chronicle*, 1985, vol. 61, no. 5, pp. 436–438. <https://doi.org/10.5558/tfc61436-5>
40. Zar J.H. *Biostatistical Analysis*. 5th ed. Pearson Education Limited, 2014. 756 p.

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

Научная статья

УДК 575.174.015.3:582.475

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-49-64

Особенности генетической структуры популяции *Pinus sylvestris* L. в степной зоне Европейской России

И.И. Камалова, канд. биол. наук

М.Ю. Петюренко, канд. с.-х. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1956-1601>

А.П. Дегтярева✉, мл. науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9583-2368>

Н.Ф. Кузнецова, канд. биол. наук; ResearcherID: [H-7344-2014](https://orcid.org/0000-0001-9947-6698),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9947-6698>

Н.И. Внукова, науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-2720-2021](https://orcid.org/0000-0002-7807-4179),


ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7807-4179>

Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; forestgenetic@mail.ru, ali.serdyukova@yandex.ru✉, nfsenyuk@mail.ru, natalya.vnuckova@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.03.22 / Одобрена после рецензирования 28.05.22 / Принята к печати 03.06.22

Аннотация. Представлены результаты исследования генетической структуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей на экологически благоприятной территории степной зоны Европейской России. Объектом исследования служили 35-летние лесные культуры сосны (Воронежская область, Кантемировский район, III бонитет, тип лесорастительных условий – А₁, случайная выборка, 60 деревьев). Генетическое разнообразие изучалось на основе микросателлитного анализа 18 SSR-локусов (14 EST-SSR-локусов и 4 nSSR-локусов) и 2 изозимных локусов (шикиматдегидрогеназы и глутаматдегидрогеназы – Skdh и Gdh соответственно). Выявлено, что у изученной популяции все использованные микросателлитные локусы, за исключением lw_isotig02842, являются полиморфными. Получены средние показатели генетической изменчивости, рассчитанные по микросателлитным локусам: доля полиморфных локусов – 94,44 %, среднее число аллелей на локус – 3,500, среднее эффективное число аллелей – 2,466, наблюдаемая и ожидаемая гетерозиготность – 0,209 и 0,493 соответственно, индекс фиксации Райта – 0,577. Насаждение по уровню аллельного разнообразия характеризуется относительно более низкими значениями генетико-статистических популяционных параметров (средней наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготностью) по сравнению с естественными лесостепными популяциями Центрально-Черноземного района. Высокий положительный индекс фиксации Райта указывает на наличие у деревьев повышенной доли инбридинга. Обсуждаются причины и возможная природа выявленного феномена. На основании изоферментного анализа рассмотрена генетическая структура локусов Skdh и Gdh. Результаты свидетельствуют о высокой частоте быстрого аллеля Skdh-1¹ (82 %) и эмбрионального полулетального аллеля Gdh-1¹ (22 %), что, по-видимому, можно считать одним из механизмов адаптации популяции к условиям более теплого и сухого климата района степей. Установлен недостаток гетерозигот глутаматдегидрогеназы. Отмечено, что группы EST-SSR- и nSSR-локусов различаются по уровню генетической изменчивости и популяционной структуре. Показано, что совместное использование разных типов генетических маркеров дает возможность получить более полную и объективную информацию об отличительных

© Камалова И.И., Петюренко М.Ю., Дегтярева А.П., Кузнецова Н.Ф., Внукова Н.И., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

особенностях генетической структуры сосновых лесов в оптимальной и пессимальной зонах ареала. Изученные 18 микросателлитных локусов могут быть использованы для оценки генетического разнообразия популяций и деревьев сосны обыкновенной в степном районе Европейской России.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, SSR-маркер, изоферментный анализ, аллельная структура, генетическое разнообразие, Воронежская область

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания ВНИИЛГСбиотех. Коллектив авторов выражает глубокую признательность кандидату биологических наук Г.В. Калько и сотрудникам исследовательской лаборатории СПбНИИЛХ за помощь и консультации при выполнении работ со специализированными компьютерными программами, позволяющими провести анализ структуры молекулярной генетической изменчивости популяций.

Для цитирования: Камалова И.И., Петюренко М.Ю., Дегтярева А.П., Кузнецова Н.Ф., Внукова Н.И. Особенности генетической структуры популяции *Pinus sylvestris* L. в степной зоне Европейской России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 49–64. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-49-64>

Original article

The Genetic Structure Features of the *Pinus sylvestris* L. Population in the Steppe Zone of European Russia

Irina I. Kamalova, Candidate of Biology

Marta Yu. Peturenko, Candidate of Agriculture; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1956-1601>

Alina P. Degtyareva[✉], Junior Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9583-2368>

Nina F. Kuznetsova, Candidate of Biology; ResearcherID: [H-7344-2014](https://orcid.org/0000-0001-9947-6698),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9947-6698>

Natal'ya I. Vnukova, Research Scientist; ResearcherID: [ABB-2720-2021](https://orcid.org/0000-0002-7807-4179),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7807-4179>

All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation; forestgenetic@mail.ru, ali.serdyukova@yandex.ru[✉], nfsenyuk@mail.ru, natalya.vnuckova@yandex.ru

Received on March 2, 2022 / Approved after reviewing on May 28, 2022 / Accepted on June 3, 2022

Abstract. The article presents the results of study of the genetic structure of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growing in the ecologically favorable territory of the steppe zone of European Russia. 35-year-old pine forest plantations (the Voronezh Region, Kantemirovskiy District, the 3rd bonitet class, forest site type – A1, a random sample, 60 trees) have been chosen as the object of the study. Genetic diversity has been examined on the basis of the microsatellite analysis of 18 SSR-loci (14 EST-SSR-loci and 4 nSSR-loci) and two isozymic loci (shikimate dehydrogenase and glutamate dehydrogenase – or Skdh and Gdh, respectively). It has been revealed that in the studied population, all the used microsatellite loci, with the exception of lw_isotig02842, are polymorphic. The average values of genetic variability calculated from the microsatellite loci have been obtained: the proportion of the polymorphic loci – 94.44 %, the



average number of alleles per locus – 3.500, the average effective number of alleles – 2.466, the observed and expected heterozygosity – 0.209 and 0.493 respectively; the Wright fixation index – 0.577. In terms of the level of allelic diversity, the plantation is characterized by relatively lower values of genetic and statistical population parameters (the average observed and expected heterozygosity) compared to the natural forest-steppe populations of the Central Chernozem Region. A high positive Wright fixation index indicates the presence of an increased proportion of inbreeding in the steppe population trees. The reasons and possible nature of the revealed phenomenon are discussed. Based on the isoenzyme analysis, the genetic structure of the Skdh and Gdh loci is examined. The results of the analysis indicate a high frequency of the rapid allele Skdh-1¹ (82 %) and the embryonic semi-lethal allele Gdh-1¹ (22 %), which, apparently, can be considered as one of the mechanisms of the population adaptation to the conditions of a warmer and drier climate of the steppe region. A deficiency of glutamate dehydrogenase heterozygotes has been established. It has also been noted that the groups of EST-SSR-loci and nSSR-loci differ in the level of genetic variability and population structure. It has been shown that the combined use of different types of genetic markers makes it possible to obtain more complete and objective information on the distinctive features of the genetic structure of pine forests in the optimal and pessimal zones of the range. The studied 18 microsatellite loci can be used to assess the genetic diversity of Scots pine populations and trees in the steppe region of European Russia.

Key words: Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), SSR-marker, isoenzyme analysis, allelic structure, genetic diversity, the Voronezh Region

Acknowledgements: This work was carried out within the framework of the state assignment of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology. The authors express their deep appreciation to G.V. Kal'ko – Candidate of Biology, as well as the staff of the research laboratory of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology for the assistance and advice in performing work with specialized computer programs allowing to analyze the structure of molecular genetic variability of populations.

For citation: Kamalova I.I., Peturenko M.Yu., Degtyareva A.P., Kuznetsova N.F., Vnukova N.I. The Genetic Structure Features of the *Pinus sylvestris* L. Population in the Steppe Zone of European Russia. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 49–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-49-64>

Введение

Степи Европейской России представляют собой относительно геологически молодое образование и характеризуются сухим континентальным климатом [19]. Растительный покров здесь в основном образован разнотравно-злаковой и злаковой растительностью, кустарниками и небольшими (островными) лесными массивами [3]. Сосновые леса на всей территории принадлежат к пессимальной зоне ареала. Их продуктивность снижается до III класса бонитета, повышается фенологическая и генетическая изменчивость, изменяется генетическая структура [3, 13, 14, 29, 36, 37]. Показано, что уровень генетической изменчивости популяций напрямую связан с их жизнеспособностью и способностью к адаптации [1], что определяет актуальность исследований.

Для изучения генетической структуры, внутри- и межпопуляционной изменчивости, генетической дифференциации популяций лесных древесных растений используют генетические маркеры – аллозимы [5–7, 9, 11, 15, 17, 18, 21–23]. Особую информативность имеют ген-ферментные локусы, являющиеся эмбриональными полуплетелями. Согласно концепции В.А. Струнникова [24], их

негативное влияние может нейтрализоваться скоординированным комплексом компенсаторных генов. Организмы, имеющие эмбриональный полулеталь в гомозиготном состоянии и являющиеся носителями такого комплекса генов, отличаются жизнеспособностью, более высоким качеством морфологических и хозяйственно ценных признаков.

Ген-ферментный локус шикиматдегидрогеназы (Skdh) представлен 2 аллельными вариантами. Фермент участвует в шикиматном пути, в ходе которого образуются соединения, необходимые для метаболизма растений. Установлено, что Skdh растений реагирует на изменения среды [30], включена в метаболизм по адаптации к стрессу и может служить маркером их устойчивости к разным условиям мест произрастания. В нашей предыдущей работе [10] было выявлено сопряженное с жизнеспособностью и адаптивностью различие генетической структуры локуса Skdh в географических культурах ели, произрастающих в разных климатических зонах России. Это дало основание предположить наличие у сосны такой же функциональной связи фермента Skdh с реакцией на стрессовые климатические условия района степей.

Ген-ферментный локус глутаматдегидрогеназы (Gdh) у сосны обыкновенной также представлен 2 аллельными вариантами. Аллель, кодирующий наиболее подвижную при электрофорезе форму фермента Gdh (Gdh-1¹), является эмбриональным полулетаем [9]. Данный фермент важен для катаболизма и синтеза аминокислот и в конечном итоге влияет на продуктивность и устойчивость растений.

В настоящее время для лесобразующих хвойных пород разработаны новые микросателлитные (SSR) локусы, показана их эффективность при оценке генетического разнообразия [2, 16, 28, 34, 38]. На основе генетических маркеров изучена устойчивость *Pinus taeda* L. к засухе [32]. Однако данные по изменчивости генетической структуры степных популяций *Pinus sylvestris* L. на территории Европейской России, основанные на исследовании полиморфизма ДНК с применением маркеров ядерного генома, отсутствуют.

Цель исследования – комплексное изучение генетической изменчивости микросателлитных и изоферментных локусов, выявление на их основе закономерностей изменения генетико-статистических параметров насаждения *Pinus sylvestris* L. в степной зоне Центрально-Черноземного района (ЦЧР) для последующего их использования в селекционных программах и мероприятиях по сохранению генетических ресурсов сосновых лесов в пессимальной зоне ареала.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служили типичные по фенотипу и бонитету 35-летние лесные культуры сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающие на южной границе ЦЧР (Воронежская область, Кантемировский район, 49°66′ с. ш. 39°75′ в. д., экологически благоприятная территория). Лесные культуры заложены в 1985 г. по склонам оврагов и балок, имеют III бонитет, тип лесорастительных условий – А₁. Объем популяционной выборки – 60 деревьев.

Выделение суммарной ДНК из хвои деревьев проводили с использованием набора diaGene («Диаэм») для растительной ткани по методике [20]. Для анализа генетической изменчивости сосны обыкновенной выбраны следующие

олигонуклеотидные последовательности ядерных микросателлитных праймеров: 14 EST-SSR-праймеров (транскрибируемая часть ядерной ДНК), подобранных к локусам lw_isotig04204, lw_isotig07383, lw_isotig10603, lw_isotig17679, lw_isotig21953, lw_isotig27940, lw_isotig00080, lw_isotig00081, lw_isotig01420, lw_isotig02842, lw_isotig04195, lw_isotig04306, lw_isotig05123, lw_isotig20215, и 4 ядерных микросателлитных локуса (nSSR) – PtTx4011, PtTx3107, PtTx4001, SPAC12.5 [28, 34, 38]. Перечень и характеристика микросателлитных локусов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика SSR-локусов сосны обыкновенной
Characterics of the SSR-loci of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)

Локус	Мотив*	Размер фрагмента, пар нуклеотидов	Температура отжига праймера, °С	Литературный источник	Объект
lw_isotig04204	(CGGCT) ₅	230	55	[34]	<i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>
lw_isotig10603	(CAG) ₇	196	55		
lw_isotig17679	(TTAA) ₅	277	55		
lw_isotig21953	(ATGGG) ₇	208	55		
lw_isotig27940	(TGGA) ₅	231	55		
lw_isotig00080	(CCG) ₆	177	55		
lw_isotig00081	(CCG) ₆	290	58		
lw_isotig01420	(CTG) ₅	174	50		
lw_isotig04195	(GAG) ₅	189	55		
lw_isotig04306	(TCC) ₇	196	55		
lw_isotig05123	(GAG) ₆	166	55		
lw_isotig20215	(TA) ₇	186	55		
lw_isotig07383	(GAT) ₈	191	55		
lw_isotig02842	(AGA) ₅	229	55		
PtTx4011	(CA) ₂₀	250–277	52	[28]	<i>Pinus taeda</i> L.
PtTx4001	(GT) ₁₅	160–187	52		
PtTx3107	(CAT) ₁₄	150–177	52		
SPAC12.5	(GT) ₂₀ (GA) ₁₀	115–210	52	[38]	<i>Pinus sylvestris</i> L.

*Повторяющаяся последовательность нуклеотидов.

Полимеразную цепную реакцию (ПЦР) проводили в амплификаторе Real-time CFX96 Touch. При постановке реакции объемом 25 мкл в смесь добавляли прямой и обратный праймер по 0,2–0,4 мкМ каждого, матрицу ДНК до 25 нг на реакцию и стерильную воду – до 25 мкл. Все ПЦР выполнены в 3 повторностях для верификации воспроизводимости результатов. Процедуры амплификации осуществляли по методике, представленной в [28, 34, 38]. Результаты амплификации визуализировали с помощью горизонтального электрофореза, имеющего повышенную четкость разделения фрагментов, в 3%-й агарозе марки MS-12 Molecular Screening. Гели окрашивали бромистым этидием.

Для определения размеров фрагментов амплифицированной ДНК в агарозном геле использовали маркер длин ДНК 100 + bp DNA Ladder («Евроген», Россия). Распознавание размера продуктов амплификации на электрофореграмме осуществлялось при помощи программного обеспечения Labimage 4.2.3.

Электрофоретический анализ изоферментов проводили в вертикальном полиакриламидном геле с дальнейшим гистохимическим окрашиванием фермента по модифицированной нами методике [9]. В анализе использовали следующие ферментные системы: Skdh (КФ 1.1.1.25) и Gdh (КФ 1.4.1.2). Белковые экстракты получали путем гомогенизации индивидуальных эндоспермов семян сосны. Генотипы материнских деревьев определяли по данным анализа 6–10 эндоспермов.

Показатели генетической изменчивости: среднее число аллелей на локус (A), среднее эффективное число аллелей (n_e), наблюдаемая (H_o) и ожидаемая (H_e) гетерозиготность, коэффициент фиксации Райта (F) – определяли с помощью программы GenAlEx 6.503 [35].

Результаты исследования и их обсуждение

Способность степных популяций сосны обыкновенной к адаптивной изменчивости имеет особое значение для выживания, т. к. вид произрастает в условиях, лишь частично отвечающих его биологии. На основании данных микросателлитного анализа нами проведена оценка частоты каждого аллеля кантемировской популяции. Всего в ней выявлено 35 аллельных вариантов. Количество обнаруженных редких аллелей (с частотой встречаемости < 0,05) составило 5,7 %. Отметим, что используемые показатели при определении основных популяционно-генетических характеристик должны давать стабильные оценки генетической изменчивости и быть чувствительными. Для адекватной оценки генетического разнообразия популяции для каждого показателя необходимо знать достаточное для выбранной точности количество деревьев в выборке. По данным И.И. Камаловой [9], число редких аллелей очень сильно зависит от объема выборки и даже при выборке в 100 особей оценка показателя достигает лишь половины от числа редких аллелей, выявленных в генеральной совокупности. При этом очевидна положительная зависимость числа выявляемых редких аллелей и показателей полиморфности P (доля полиморфных локусов) и среднего числа аллелей на локус от объема выборки [25]. Параметры генетической изменчивости кантемировской популяции сосны, полученные с помощью микросателлитных локусов, приведены в табл. 2.

Анализ генетической структуры показал, что все 18 использованных ядерных микросателлитных локусов, за исключением lw_isotig02842, полиморфны. Локусы lw_isotig27940 и lw_isotig21953, у которых наблюдалось от 8 до 12 аллелей, проявили себя как высокополиморфные, что подтверждает ранее полученные данные по сосне обыкновенной [8, 26]. Так, у локуса lw_isotig21953 обнаружено от 9 до 14 аллельных вариантов. Семь локусов (lw_isotig01420, lw_isotig10603, lw_isotig20215, lw_isotig00080, lw_isotig04204, SPAC12.5, PtTx4001) были менее полиморфны. Количество идентифицированных у них аллельных вариантов существенно меньше – от 3 до 4. Наименее изменчивыми оказались 6 EST-SSR-локусов: lw_isotig04306, lw_isotig00081, lw_isotig07383, lw_isotig05123, lw_isotig17679 и lw_isotig04195, имеющие по 2 аллеля. Среди nSSR-локусов PtTx3107 и PtTx4011 также характеризуются 2 аллельными вариантами (табл. 2).

Таблица 2

**Генетическая изменчивость деревьев кантемировской популяции
сосны обыкновенной в степной зоне Воронежской области**
**Genetic variability of the trees of the Kantemirovskaya population
of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the steppe zone of the Voronezh Region**

Локус	A	n_e	H_o	H_e	F
lw_isotig04306	2	1,763	0,283	0,433	0,345
lw_isotig01420	3	1,956	0,050	0,489	0,898
lw_isotig27940	8	4,635	0,322	0,784	0,589
lw_isotig10603	3	2,230	0,327	0,552	0,407
lw_isotig07383	2	1,194	0,125	0,163	0,231
lw_isotig20215	4	2,974	0,067	0,664	0,900
lw_isotig05123	2	1,724	0,017	0,420	0,960
lw_isotig17679	2	1,733	0,214	0,423	0,493
lw_isotig00800	4	2,067	0,083	0,516	0,839
lw_isotig04195	2	1,744	0,017	0,427	0,961
lw_isotig04204	4	2,481	0,458	0,597	0,233
lw_isotig02842	1	1,000	0,000	0,000	Н/д
lw_isotig00081	2	2,000	1,000	0,500	1,000
lw_isotig21953	12	8,054	0,550	0,876	0,372
SPAC12.5	4	3,205	0,196	0,688	0,714
PtTx4001	4	2,283	0,017	0,562	0,970
PtTx4011	2	1,444	0,034	0,307	0,888
PtTx3107	2	1,894	0,000	0,472	1,000

Примечание: Н/д – нет данных.

Низкий уровень изменчивости популяционной выборки, как уже отмечалось выше, зафиксирован у локуса lw_isotig02842, для которого значение и наблюдаемой, и ожидаемой гетерозиготности составило 0. Данный локус имел только 1 аллель размером ориентировочно около 229 пар нуклеотидов и являлся мономорфным. У *Pinus sylvestris* L. получены несколько отличные по сравнению с *P. sylvestris* var. *mongolica* результаты по количеству аллелей в SSR-локусах. Так, P. Fang et al. [34] было найдено для локуса lw_isotig02842 более 1 аллеля. Результаты [15] отчетливо указывают на существование различий в количестве аллелей для разных типов локусов. К примеру, при характеристике популяционной структуры *P. sylvestris* в зоне тайги (Республика Коми, Ухтинский лесхоз) один из локусов (GOT-1) оказался мономорфным во всех 4 изученных насаждениях. При этом в популяциях сосны других регионов России и Европы он являлся полиморфным. Возможно, это обусловлено различиями в происхождении образцов или особыми лесорастительными условиями. Несмотря на то, что для локуса lw_isotig02842 не выявлено полиморфизма между образцами выборки, он может быть полезен в случае дальнейшей аридизации регионального климата или при смене географического расположения популяций в пределах ареала.

Анализ усредненных основных параметров генетической изменчивости позволил обнаружить, что степная кантемировская популяция характеризуется относительно высоким уровнем генетического разнообразия (табл. 3).

Таблица 3

Генетические параметры SSR-локусов кантемировской популяции сосны обыкновенной в степной зоне Воронежской области
Genetic parameters of the SSR-loci of the Kantemirovskaya population of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the steppe zone of the Voronezh Region

Локус	P ₉₉ , %	A±SE	n _c ±SE	H _o ±SE	H _c ±SE	F±SE
EST-SSR, nSSR	94,44	3,500± ±0,622	2,466± ±0,382	0,209± ±0,061	0,493± ±0,049	0,577± ±0,116
<i>В том числе:</i>						
EST-SSR	92,86	3,643± ±0,789	2,540± ±0,484	0,251± ±0,074	0,489± ±0,060	0,479± ±0,140
nSSR	100	3,000± ±0,577	2,207± ±0,374	0,062± ±0,045	0,507± ±0,080	0,893± ±0,064

Примечание: ±SE – ошибка средней.

Эффективное число аллелей в среднем по выборке равно 2,466. Показатель имеет большую информативность, чем среднее число аллелей на локус, и применим в популяционных исследованиях. Среднее эффективное число аллелей при выборочных исследованиях в значительной степени зависит от объема выборки и имеет высокую (с занижением величины) систематическую ошибку. Тем не менее этот показатель широко используется для оценки генетического разнообразия популяций.

Из данных табл. 3 видно, что усредненный уровень полиморфизма амплифицированных фрагментов ДНК, полученных в результате полимеразной цепной реакции с 18 SSR-локусами, составил 94,44 %. При этом значения показателя в суммарной выборке в зависимости от SSR-локуса варьировали в пределах 92,86–100 % – для EST-SSR-локусов и nSSR локусов соответственно.

В табл. 3 отражены средние значения индекса фиксации Райта (коэффициент инбридинга). Известно, что преобладание отрицательных и близких к 0 значений этого индекса свидетельствует об отсутствии ощутимого дефицита гетерозигот, в то время как высокие положительные значения указывают на дефицит и повышенную долю инбридинга в генотипическом составе аутбредного потомства хвойных растений [21]. Заметные отклонения от нормы индекса у кантемировской популяции (0,577) говорят о наличии в ее семенной продукции повышенной доли инбредного потомства. У ряда степных популяций сосны обыкновенной, произрастающих в разных регионах данной природной зоны, коэффициент инбридинга также показал уровень инбридинга выше 0,5 [36, 37].

Что касается природы выявленного феномена, то Т. East [31] еще в 1929 г. установил зависимость инбридинга от температуры у цветковых растений. Исследователь отметил, что максимум интенсивности приходится на оптимальный для каждого вида температурный режим, а при отклонении от нормы (увеличение/уменьшение) барьер самофертильности снижается. Аналогичные результаты получены нами в 12-летнем эксперименте по самоопылению, который проводился на 50 модельных деревьях сосны обыкновенной [12]. Отмечено, что признак самофертильности очень чувствителен к температуре и начинает реагировать на ее изменение в теплые и холодные годы. В раннюю засуху доля инбредных семян в семенной продукции года повышается пропорционально

силе погодного стресса и роль инбридинга в системе семенного размножения существенно возрастает [12, 33]. Так как степная популяция развивается в более жарком климате, то повышение доли инбредного потомства – ожидаемый результат для пессимальной зоны видového ареала, что и подтвердил высокий положительный индекс фиксации Райта ее деревьев (табл. 3).

У сосны обыкновенной между уровнем самофертильности дерева и его индивидуальной гетерозиготностью выявлена достоверная связь [7]. Показано, что набор из 18 микросателлитных локусов (EST-SSR- и nSSR-локусы) в среднем дает индекс фиксации 0,577, что указывает на избыток гомозигот. При этом усредненные значения по 14 транскрибируемыми EST-SSR-локусам и 4 ядерным nSSR-локусам соответствуют среднему индексу фиксации Райта выборки (хотя nSSR-локусы имеют завышенные значения). Показатель этого параметра также свидетельствует о существенном избытке гомозигот ($F = 0,479$ и $F = 0,893$ соответственно).

Средняя наблюдаемая гетерозиготность у EST-SSR-локусов выше, чем у nSSR-локусов, – соответственно 0,251 и 0,062, при этом отмечено, что показатели количества аллелей на локус (среднее и среднее эффективное число) у них также выше – соответственно 3,643 и 2,540 против 3,000 и 2,207.

Материалы межпопуляционного анализа показали, что у кантемировской популяции по сравнению с ценопопуляциями сосны болотных и суходольных экотопов Республики Марий Эл, произрастающих в Монголии и южных районах Сибири, выявленные по аллозимным локусам среднее количество аллелей на локус и гетерозиготность имели более близкие показатели [4, 27].

В основе установленных отличий, помимо эколого-эдафических факторов, могут лежать еще 2 причины. Во-первых, выборки деревьев анализировались с учетом разных параметров (количества локусов, вида молекулярного маркера и т. д.). Во-вторых, не всегда степень дифференциации популяций по микросателлитным и изоферментным маркерам совпадает вследствие того, что разные маркеры характеризуют полиморфизм участков ДНК, обладающих различной скоростью мутирования, уровнем нейтральности и наследования. При этом, как правило, сохраняется тенденция более высоких вычисленных по микросателлитам показателей изменчивости между популяциями. Оценки, полученные на базе SSR, в 2 и более раз выше, чем полученные на основе аллозимного анализа.

Анализируемая степная популяция в целом обладает достаточно большим запасом генетической изменчивости: более 90 % ее локусов находится в полиморфном состоянии, количество аллелей на локус достигает 3,5, каждое дерево в среднем гетерозиготно по 25 % своих генов. Большинство локусов оказались высокоизменчивыми, поскольку ожидаемая гетерозиготность у них находилась в пределах 43,5 % или превышала это значение.

Для поиска молекулярных маркеров устойчивости сосны обыкновенной к стрессовым гидротермическим условиям степной зоны проанализирована генетическая структура изоферментных локусов Skdh и Gdh. Выбор ферментных систем обусловлен большим значением данных ферментов для метаболизма, синтеза аминокислот, азотного обмена и функционирования растительных организмов. Установлено, что в генетической структуре локуса Skdh преобладают гомозиготные по быстрому (при электрофорезе) аллелю организмы с генотипом Skdh-1¹/Skdh-1¹, доля которых составляет 67 %. В

аллельной структуре также отмечается существенное превышение (в 4 раза) частоты быстрого аллеля $Skdh-1^1$ над частотой аллеля $Skdh-1^2$: 82 % против 18 %. Распределение частот генетической и аллельной структур $Skdh$ в анализируемой популяции представлено на рис. 1.

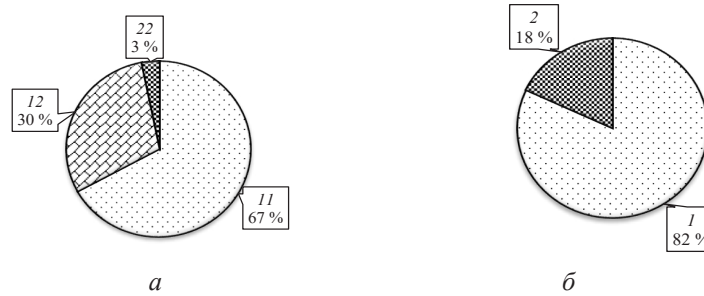


Рис. 1. Частоты генотипов (а) и аллелей (б) локуса $Skdh$ сосны обыкновенной: 11, 12 и 22 – соответственно генотипы $Skdh-1^1/Skdh-1^1$, $Skdh-1^1/Skdh-1^2$ и $Skdh-1^2/Skdh-1^2$; 1 – аллель $Skdh-1^1$; 2 – аллель $Skdh-1^2$

Fig. 1. Frequencies of genotypes (a) and alleles (b) of the $Skdh$ locus of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): 11, 12, and 22 are the $Skdh-1^1/Skdh-1^1$, $Skdh-1^1/Skdh-1^2$ and $Skdh-1^2/Skdh-1^2$ genotypes, respectively; 1 – the $Skdh-1^1$ allele; 2 – the $Skdh-1^2$ allele

Анализ генетической структуры Gdh показал преобладание гомозигот по медленному (при электрофорезе) аллелю (генотип $Gdh-1^2/Gdh-1^2$) – доля таких деревьев в выборке составляет 63 %. Так же, как и в генетической структуре $Skdh$, число гетерозиготных растений – 30 %. В аллельной структуре отмечено преобладание $Gdh-1^2$ – 78 %, что в 3,5 раза выше, чем частота аллеля $Gdh-1^1$. Частоты генотипов и аллелей по локусу Gdh представлены на рис. 2.

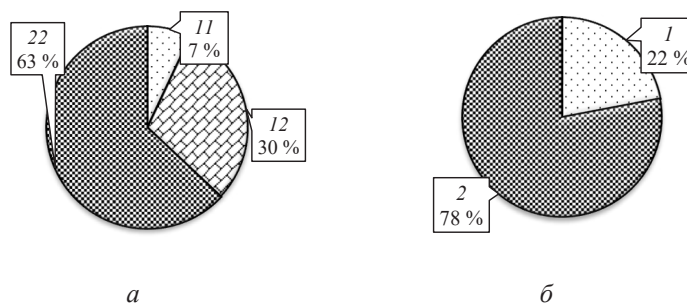


Рис. 2. Частоты генотипов (а) и аллелей (б) локуса Gdh сосны обыкновенной: 11, 12 и 22 – соответственно генотипы $Gdh-1^1/Gdh-1^1$, $Gdh-1^1/Gdh-1^2$ и $Gdh-1^2/Gdh-1^2$; 1 – аллель $Gdh-1^1$; 2 – аллель $Gdh-1^2$

Fig. 2. Frequencies of genotypes (a) and alleles (b) of the Gdh locus of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): 11, 12, and 22 are the $Gdh-1^1/Gdh-1^1$, $Gdh-1^1/Gdh-1^2$ and $Gdh-1^2/Gdh-1^2$ genotypes, respectively; 1 – the $Gdh-1^1$ allele; 2 – the $Gdh-1^2$ allele

В табл. 4 приведена характеристика генетической структуры популяции по локусам $Skdh$ и Gdh . Из данных таблицы видно, что наблюдаемая и ожидаемая гетерозиготность локуса $Skdh$ различаются всего на 2 %. Это говорит о том, что

популяция по данному локусу находится в состоянии равновесия. По локусу Gdh различия между показателями более существенны и составляют 4 %, что может свидетельствовать о нехватке в популяции гетерозигот. Эффективное число аллелей в изученных локусах практически одинаково и составляет 1,43 по локусу Gdh и 1,42 по локусу Skdh. Индекс фиксации Райта по локусу Gdh в 1,8 раз выше, чем по локусу Skdh, и составляет 0,118, что подтверждает высокий уровень инбридинга.

Таблица 4

Показатели генетической изменчивости популяции сосны обыкновенной по локусам Skdh и Gdh

Genetic variability indicators of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) population at the Skdh and Gdh loci

Показатель	Skdh	Gdh
H_o , %	29	30
H_e , %	31	34
n_e	1,42	1,43
F	0,065	0,118

В табл. 5 отражены данные сравнения параметров генетической структуры локуса Gdh кантемировской степной популяции с эталонными лесостепными насаждениями сосны обыкновенной ЦЧР: Усманский (Воронежский государственный природный биосферный заповедник им. В.М. Пескова) и Хреновской боры – соответственно север и юг лесостепной зоны Воронежской области.

Таблица 5

Генетическая структура локуса Gdh сосны обыкновенной из разных природных условий

Genetic structure of the Gdh locus of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from different environmental conditions

Объект	Аллели, %		Генотипы, %			H_o	H_e	n_e	F
	1	2	11	12	22				
Кантемировская популяция	22	78	7	30	63	30	34	1,43	0,118
Усманский бор	32	68	10	45	45	45	44	1,78	-0,03
Хреновской бор	26	74	4	44	52	44	39	1,63	-0,13

Примечание: Условные обозначения 1, 2, 11, 12 и 22 – см. рис. 2.

Установлено, что среди изученных популяций сосны обыкновенной ЦЧР наибольшее число полулетальных генотипов (Gdh-1¹/Gdh-1¹) и аллелей (Gdh-1¹) присутствует в генетической структуре Усманского бора: число аллелей выше на 6–10 %, число генотипов – на 3–6 %. Наблюдаемая гетерозиготность у естественных лесостепных популяций выше на 15 %, эффективное число аллелей больше. Коэффициент инбридинга почти равняется 0, что свидетельствует о близком к равновесному состоянию естественных популяций, в то время как данный показатель в степной популяции составляет 0,118. Полученные результаты могут быть обусловлены различием природно-климатических условий мест произрастания.

Заключение

Полученные результаты говорят о возможности использования 18 изученных микросателлитных локусов для генетических исследований вида *Pinus sylvestris* L. Микросателлитные локусы позволяют устанавливать генетическую дифференциацию и в совокупности с изоферментными типами маркеров применимы в качестве источника информации о состоянии внутривидового генетического разнообразия вида на юге пессимальной зоны ареала.

Для получения более полной и объективной информации о генетическом разнообразии популяций целесообразно использовать разные по типу наследования и уровню изменчивости генетические маркеры, которые, дополняя друг друга, представляют различные типы трансформации одной и той же внутриклеточной структуры, функционирующей по принципу взаимодействия «генотип–среда», «вид–среда».

Анализ генетической структуры степной популяции показал, что все рассмотренные микросателлитные локусы, за исключением *lw_isotig02842*, являются полиморфными. Всего выявлено 35 аллелей. Насаждение по уровню аллельного разнообразия характеризуется относительно более низкими генетико-статистическими популяционными параметрами (средними наблюдаемой и ожидаемой гетерозиготностью) по сравнению с естественными лесостепными популяциями Европейской России. Обнаружен довольно высокий средний уровень генетического разнообразия по микросателлитным локусам и при этом установлен дефицит гетерозигот. Это подтверждают положительные значения статистик Райта по SSR-локусам, а также коэффициент инбридинга по локусу глутаматдегидрогеназы. По результатам анализа генетической структуры локуса шикиматдегидрогеназы (*Skdh*) установлена высокая частота быстрого аллеля *Skdh-1¹* (82 %), что, по-видимому, можно рассматривать как внутриклеточный механизм по адаптации растений к условиям более теплого и сухого климата района степей. В генетической структуре локуса глутаматдегидрогеназы доля аллеля, являющегося эмбриональным полуплетелем, составляет 22 % от числа проанализированных аллелей; он, по-видимому, также может обладать адаптационными способностями благодаря действию комплекса компенсаторных генов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алтухов Ю.П. Генетические процессы в популяциях. М.: Наука, 1989. 328 с. Altukhov Yu.P. *Genetic Processes in Populations*. Moscow, Nauka Publ., 1989. 328 p. (In Russ.).
2. Белоконь М.М., Политов Д.В., Мудрик Е.А., Полякова Т.А., Шатохина А.В., Белоконь Ю.С., Орешкова Н.В., Путинцева Ю.А., Шаров В.В., Кузмин Д.А., Крутовский К.В. Разработка микросателлитных маркеров сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) по результатам полногеномного *de novo* секвенирования // Генетика. 2016. Т. 52, № 12. С. 1418–1427.
Belokon' M.M., Politov D.V., Mudrik E.A., Polyakova T.A., Shatokhina A.V., Belokon' Yu.S., Oreshkova N.V., Putintseva Yu.A., Sharov V.V., Kuzmin D.A., Krutovsky K.V. Development of Microsatellite Markers for Siberian Stone Pine (*Pinus sibirica* Du Tour) Based on the *de novo* Whole Genome Sequencing. *Genetika* = Russian Journal of Genetics, 2016, vol. 52, no. 12, pp. 1418–1427. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0016675816120031>

3. Бельгард А.Л. Степное лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 321 с.
Bel'gard A.L. *Steppe Forestry*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 321 p. (In Russ.).
4. Гладков Ю.Ф., Шейкина О.В. Генетический полиморфизм деревьев сосны обыкновенной из смежных болотной и суходольной ценопопуляций по ядерным микросателлитным локусам // Вестн. ПГТУ. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2019. № 4(44). С. 70–79.
Gladkov Yu.F., Sheikina O.V. Genetic Polymorphism of the *Pinus sylvestris* Trees from Bog Land and Upland Cenopopulations on Nuclear SSR Loci. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovaniye* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management, 2019, no. 4(44), pp. 70–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2306-2827.2019.4.70>
5. Ивановская С.И. Генетический потенциал сосновых насаждений Полесского лесосеменного района на основе молекулярно-генетического анализа // Тр. БГТУ. Сер. 1: Лесн. хоз-во. 2012. № 1(148). С. 168–171.
Ivanovskaya S.I. Genetic Potential of Pine Plantations of the Polessky Forest Seed Region Area on Molecular Genetic Analysis. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoye khozyaystvo* = Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, 2012, no. 1(148), pp. 168–171. (In Russ.).
6. Ивановская С.И. Оценка генофонда сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в плюсовых насаждениях Беларуси по данным изоферментного анализа // Тр. БГТУ. Сер. 1: Лесн. хоз-во. 2014. № 1(165). С. 130–134.
Ivanovskaya S.I. Assessment of the Gene Pool of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in Plus Plantations of Belarus according to Isoenzyme Analysis. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoye khozyaystvo* Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, 2014, no. 1(165), pp. 130–134. (In Russ.).
7. Исаков Ю.Н., Семерилов В.Л. Связь генотипа по некоторым аллозимным локусам и способности к самоопылению у сосны обыкновенной // Генетика. 1997. Т. 33, № 2. С. 274–276.
Isakov Yu.N., Semerikov V.L. The Relationship of the Genotype for Some Allozyme Loci and the Ability for Self-Pollination in Scots Pine (*Pinus sylvestris*). *Genetika* = Russian Journal of Genetics, 1997, vol. 33, no. 2, pp. 274–276. (In Russ.).
8. Калько Г.В. Тестирование ядерных микросателлитных маркеров сосны обыкновенной // Тр. СПбНИИЛХ. 2017. № 1. С. 23–34.
Kal'ko G.V. The Testing of Nuclear Microsatellite Markers of Scots Pine. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2017, no. 1, pp. 23–34. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2017.1.23>
9. Камалова И.И. Методические указания для идентификации клонов сосны обыкновенной с использованием ген-ферментных маркеров. Воронеж: НИИЛГИС, 2001. 24 с.
Kamalova I.I. *Guidelines for Identifying Scots Pine Clones using the Gene-Enzyme Markers*. Voronezh, Research Institute of Forest Genetics and Breeding Publ., 2001. 24 p. (In Russ.).
10. Камалова И.И., Внукова Н.И., Наквасина Е.Н., Шутяев А.М. Особенности изменчивости ферментных локусов в популяциях ели в географических культурах // Генетические ресурсы культурных растений. Проблемы эволюции и систематики культурных растений: Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 120-летию со дня рождения Е.Н. Синской, Санкт-Петербург, 9–11 дек. 2009 г. СПб.: Всерос. науч.-исслед. ин-т растениеводства им. Н.И. Вавилова, 2009. С. 69–72.
Kamalova I.I., Vnukova N.I., Nakvasina E.N., Shutyaev A.M. The Features of the Enzyme Loci Variability in Spruce Populations of Provenance Trial Plantations. *Genetic Resources of Cultivated Plants. Problems of Crop Evolution and Systematics: Materials of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 120th Anniversary of the*

Birth of E.N. Sinskaya (St. Petersburg, December 09–11, 2009). St. Petersburg, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources Publ., 2009, pp. 69–72. (In Russ.).

11. Крутовский К.В., Политов Д.В., Алтухов Ю.П., Милютин Л.И., Кузнецова Г.В., Ирошников А.И., Воробьев В.Н., Воробьева Н.А. Генетическая изменчивость сибирской кедровой сосны *Pinus sibirica* Du Tour. Сообщ. 4. Генетическое разнообразие и степень генетической дифференциации между популяциями // Генетика. 1989. Т. 25, № 11. С. 2009–2031.

Krutovsky K.V., Politov D.V., Altukhov Yu.P., Milyutin L.I., Kuznetsova G.V., Iroshnikov A.I., Vorobyov V.N., Vorobyova N.A. Genetic Variation in Siberian Stone Pine (*Pinus sibirica* Du Tour). Message 4. Genetic Diversity and the Degree of Genetic Differentiation Between Populations. *Genetika* = Russian Journal of Genetics, 1989, vol. 25, no. 11, pp. 2009–2031. (In Russ.).

12. Кузнецова Н.Ф., Исаков Ю.Н. Проявление уровня самофертильности у сосны обыкновенной в зависимости от климатических условий года // Экология. 1996. № 4. С. 264–267.

Kuznetsova N.F., Isakov Yu.N. Dependence of the Level of Self-Fertility in Scots Pine on Yearly Climatic Conditions. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 1996, no. 4, pp. 264–267. (In Russ.).

13. Матвеев Н.М. Степные леса Заволжья // Самарская Лука: Проблемы регион. и глобал. экологии. 2015. Т. 24, № 4. С. 48–71.

Matveev N.M. The Transvolga Steppe Forests. *Samarskaya Luka: Problemy regional'noy i global'noy ekologii* = Samarskaya Luka: Problems of Regional and Global Ecology, 2015, vol. 24, no. 4, pp. 48–71.

14. Мильков Ф.Н. О естественных ландшафтах юга Русской равнины // Изв. РАН. Сер.: Географическая. 1995. № 5. С. 5–18.

Milkov F.N. On the Natural Landscapes of the South of the Russian Plain. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya* = Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Geography, 1995, no. 5, pp. 5–18. (In Russ.).

15. Наквасина Е.Н., Юдина О.А., Прожерина Н.А., Камалова И.И., Минин Н.С. Географические культуры в ген-экологических исследованиях на Европейском Севере. Архангельск: САФУ им. М.В. Ломоносова, 2008. 308 с.

Nakvasina E.N., Yudina O.A., Prozherina N.A., Kamalova I.I., Minin N.S. *Provence Trials in Gene-Ecological Research in the European North*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov Publ., 2008. 308 p. (In Russ.).

16. Орешкова Н.В., Путинцева Ю.А., Шаров В.В., Кузьмин Д.А., Крутовский К.В. Разработка микросателлитных маркеров лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) на основе полногеномного *de novo* секвенирования // Генетика. 2017. Т. 53, № 11. С. 1278–1284.

Oreshkova N.V., Putintseva Yu.A., Sharov V.V., Kuz'min D.A., Krutovsky K.V. Development of Microsatellite Markers in Siberian Larch (*Larix sibirica* Ledeb.) Based on the *de novo* Whole Genome Sequencing. *Genetika* = Russian Journal of Genetics, 2017, vol. 53, no. 11, pp. 1278–1284. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0016675817110091>

17. Падутов В.Е. Генетические ресурсы сосны и ели в Беларуси. Гомель: ИЛ НАНБ, 2001. 144 с.

Padutov V.E. *Genetic Resources of Pine and Spruce in Belarus*. Gomel', Institute of Forest of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2001. 144 p. (In Russ.).

18. Падутов В.Е., Чурило Е.В., Каган Д.И., Ивановская С.И. Лесоводственная и генетическая оценка ресурсного потенциала сосновых насаждений ГЛХУ «Кореневская экспериментальная лесная база Института леса НАН Беларуси» // Вестн. ГрГУ им. Янки Купалы. Сер. 5: Экономика. Социология. Биология. 2021. Т. 11, № 1. С. 100–109.

Padutov V.E., Churilo E.V., Kagan D.I., Ivanovskaya S.I. Silvicultural and Genetic Assessment of the Resource Potential of Pine Plantations of the State Forestry Institution

“Korenevka Experimental Forest Base of the Institute of Forest of the NAS of Belarus”. *Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly. Seriya 5: Ekonomika. Sotsiologiya. Biologiya* = Vestnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 5: Economics. Sociology. Biology, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 100–109. (In Russ.).

19. Петров К.М. Степи – наша гордость и боль // Биосфера. 2012. Т. 4, № 4. С. 370–384.

Petrov K.M. Steppes: Our Pride and Our Pain. *Biosfera* = Biosphere, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 370–384. (In Russ.).

20. Петюренко М.Ю., Камалова И.И., Сердюкова А.П. Экстракция суммарной ДНК из *Pinus sylvestris* L. при оценке полиморфизма с использованием SSR- и RAPD-маркеров // Тр. СПбНИИЛХ. 2021. № 3. С. 13–25.

Peturenko M.Yu., Kamalova I.I., Serdyukova A.P. Extraction of Total DNA from *Pinus sylvestris* L. for Assessment of Polymorphism – using SSR- and RAPD-markers. *Trudy Sankt-Petersburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* = Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute, 2021, no. 3, pp. 13–25. (In Russ.). <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2021.2.13>

21. Политов Д.В., Белоконов М.М., Белоконов Ю.С. Динамика аллозимной гетерозиготности в дальневосточных популяциях кедрового стланика *Pinus pumila* (Pall.) Regel: сравнение зародышей и материнских растений // Генетика. 2006. Т. 42, № 10. С. 1348–1358.

Politov D.V., Belokon' M.M., Belokon' Yu.S. Dynamics of Allozyme Heterozygosity in Siberian Dwarf Pine *Pinus pumila* (Pall.) Regel Populations of the Russian Far East: Comparison of Embryos and Maternal Plants. *Genetika* = Russian Journal of Genetics, 2006, vol. 42, no. 10, pp. 1348–1358. (In Russ.).

22. Санников С.Н., Петрова И.В. Дифференциация популяций сосны обыкновенной. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 247 с.

Sannikov S.N., Petrova I.V. *Differentiation of Scots Pine Populations*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2003. 247 p. (In Russ.).

23. Семериков В.Л., Подогас А.В., Шурхал А.В. Структура изменчивости аллозимных локусов в популяциях сосны обыкновенной // Экология. 1993. № 1. С. 18–25.

Semerikov V.L., Podogas A.V., Shurkhal A.V. Allozyme Loci Variability Structure in Populations of Scots Pine. *Ekologiya* = Russian Journal of Ecology, 1993, no. 1, pp. 18–25. (In Russ.).

24. Струнников В.А. Новая гипотеза гетерозиса и ее научное и практическое значение // Вестн. рос. с.-х. науки. 1983. № 1(316). С. 34–40.

Strunnikov V.A. A New Hypothesis of Heterosis and its Scientific and Practical Significance. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Vestnik of the Russian Agricultural Science, 1983, no. 1(316), pp. 34–40. (In Russ.).

25. Тихонова И.В., Семериков В.Л., Семерикова С.А., Дымшакова О.С., Зацепина К.Г. О выборках в исследованиях внутривидового генетического разнообразия сосны обыкновенной // Сиб. лесн. журн. 2014. № 4. С. 99–109.

Tikhonova I.V., Semerikov V.L., Semerikova S.A., Dymshakova O.S., Zatsepina K.G. About Samples in the Research of Intraspecific Genetic Diversity of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2014, no. 4, pp. 99–109. (In Russ.).

26. Торбик Д.Н., Бедрицкая Т.В., Власова М.М., Синельников И.Г. Генетическое разнообразие естественных популяций *Pinus sylvestris* L. // Наука – лесному хозяйству Севера: сб. науч. тр. ФБУ «СевНИИЛХ». Архангельск, 2019. С. 91–99.

Torbik D.N., Bedritskaya T.V., Vlasova M.M., Sinelnikov I.G. Genetic Diversity of Natural Populations of *Pinus sylvestris* L. *Science to Northern Forestry: Collection of Scientific*

Papers of the Federal Forest Agency “Northern Research Institute of Forestry”. Arkhangelsk, 2019, pp. 91–99. (In Russ.).

27. Экарт А.К., Ларионова А.Я., Зацепина К.Г., Кравченко А.Н., Жамъянсүрэн С., Тихонова И.В., Тараканов В.В. Генетическое разнообразие и дифференциация популяций сосны обыкновенной в Южной Сибири и Монголии // Сиб. экол. журн. 2014. № 1. С. 69–78.

Ekart A.K., Larionova A.Ya., Zatsepina K.G., Kravchenko A.N., Zham'yansuren S., Tikhonova I.V., Tarakanov V.V. Genetic Diversity and Differentiation of Populations of Scots Pine in Southern Siberia and Mongolia. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2014, no. 1, pp. 69–78. (In Russ.).

28. Auckland L.D., Bui T., Zhou Y., Shepherd M., Williams C.G. *Conifer Microsatellite Handbook*. Texas A&M University, College Station TX, 2002. 57 p.

29. Behiye B.B., Kaya N. Genetic Diversity among *Pinus sylvestris* L. Populations and its Implications for Genetic Conservation: Comparison of Nuclear and Chloroplast Microsatellite Markers. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2017, vol. 26, no. 11, pp. 6873–6881.

30. Diaz J., Barceló A.R., de Cáceres F.M. Changes in Shikimate Dehydrogenase and the End Products of the Shikimate Pathway, Chlorogenic Acid and Lignins, during the Early Development of Seedlings of Capsicum Annuum. *New Phytologist*, 1997, vol. 136, iss. 2, pp. 183–188. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00743.x>

31. East E.M. Self-Sterility. *Bibliographia Genetica*, 1929, vol. 5, pp. 331–368.

32. Eckert A.J., Heerwaarden van J., Wegrzyn J.L., Nelson C.D., Ross-Ibarra J., González-Martínez S.C., Neale D.B. Patterns of Population Structure and Environmental Associations to Aridity across the Range of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L., Pinaceae). *Genetics*, 2010, vol. 185, iss. 3, pp. 969–982. <https://doi.org/10.1534/genetics.110.115543>

33. Kuznetsova N.F. Self-Fertility in Scots Pine as a System for Regulating Close Relationships and Species Survival in an Adverse Environment. *Advances in Genetic Research*. New York, Nova Science Publishers Inc., 2012, pp. 83–106.

34. Fang P., Niu S., Yuan H., Li Zh., Zhang Y., Yuan L., Li W. Development and Characterization of 25 EST-SSR Markers in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* (Pinaceae). *Applications in Plant Sciences*, 2014, vol. 2, iss. 1, art. no. 1300057. <https://doi.org/10.3732/apps.1300057>

35. Peakall R., Smouse P.E. GENALEX 6: Genetic Analysis in Excel. Population Genetic Software for Teaching and Research. *Molecular Ecology Notes*, 2006, vol. 6, iss. 1, pp. 288–295. <https://doi.org/10.1111/J.1471-8286.2005.01155.X>

36. Serdyukova A.P. The State of Scots Pine Plantations in the Steppe Voronezh Region in Drought Conditions and under Anthropogenic Influence. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 817, art. no. 012098. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/817/1/012098>

37. Şofletea N., Mihai G., Ciocîrlan E., Curtu A.L. Genetic Diversity and Spatial Genetic Structure in Isolated Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Populations Native to Eastern and Southern Carpathians. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 10, art. no. 1047. <https://doi.org/10.3390/f11101047>

38. Soranzo N., Provan J., Powell W. Characterization of Microsatellite Loci in *Pinus sylvestris* L. *Molecular Ecology*, 1998, vol. 7, iss. 9, pp. 1260–1261.

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

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

Научная статья

УДК 630*52:630*174.754

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-65-75

Возрастная динамика биомассы ольхи серой в древостоях Архангельской области

А.А. Карабан^{1,2,✉}, лаборант-исследователь, аспирант; *ResearcherID*: [HWP-3629-2023](https://orcid.org/0000-0002-2934-0303),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

В.А. Усольцев^{3,4}, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID*: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

С.В. Третьяков^{1,2}, гл. науч. сотр., д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID*: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

С.В. Коптев^{1,2}, гл. науч. сотр., д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [ABD-5497-2021](https://orcid.org/0000-0002-5402-1953),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

А.А. Парамонов¹, науч. сотр., канд. с.-х. наук; *ResearcherID*: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

И.В. Цветков^{1,2}, ст. науч. сотр., канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAU-6441-2021](https://orcid.org/0000-0002-1559-3254),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

¹Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; karaban@sevniilh-arh.ru[✉], s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru, a.paramonov@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; karaban@sevniilh-arh.ru[✉], s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru, i.tsvetkov@narfu.ru


³Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; Usoltsev50@mail.ru

⁴Ботанический сад УрО РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; Usoltsev50@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.23 / Одобрена после рецензирования 16.08.23 / Принята к печати 19.08.23

Аннотация. Оценка продуктивности лесов в лесном хозяйстве и лесной экологии имеет давнюю традицию, но за последние десятилетия произошла смена парадигм: целевая функция лесоводства, заключающаяся в выращивании древесины, сместилась в сторону биосферно-стабилизирующей функции, оценки биомассы и углерододепонирующей способности лесов. Уравнения и таблицы для оценки биомассы на уровне древостоя отличаются тем преимуществом, что могут быть применены для характеристики как биомассы отдельных древостоев и их совокупности, так и – при совмещении с данными государственного учета лесного фонда – ситуации в лесах всей страны. Трудоемкость работ по оценке биомассы деревьев и древостоев побудила исследователей использовать существующие таблицы хода роста при составлении таблиц биологической продуктивности древостоев по рекурсивному методу. Для условий северной и средней тайги Архангельской области отсутствуют таблицы хода роста по биомассе ольхи серой. Цель работы – исследование хода роста по биомассе ольхи серой в древостоях Архангельской области. Заложена серия пробных площадей для оценки надземной биомассы деревьев вида. По фактическим данным 50 модельных деревьев с 30 пробных площадей разработаны аллометрические модели зависимости фракций биомассы от объема ствола. Полученные модели совмещены с таблицами хода роста ольхи серой

© Карабан А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Парамонов А.А., Цветков И.В., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

по классам бонитета, и построена таблица биологической продуктивности вида для условий Архангельской области. Результаты сопоставлены с данными о биологической продуктивности ольхи серой в Белоруссии, Литве и Латвии. Показано, что биомасса спелых древостоев ольхи серой I–II классов бонитета в Архангельской области меньше на 3–9 %, чем в Белоруссии и Литве, для древостоев III–IV классов эта разница возрастает до 29–48 %. Подобные различия биомассы сравниваемых регионов можно объяснить неодинаковыми зональными условиями произрастания.

Ключевые слова: ольха серая, таблица хода роста древостоев, таблица биологической продуктивности, биомасса деревьев, биомасса древостоев, фракция биомассы, аллометрическая модель, Архангельская область

Благодарности: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненной в рамках госзадания СевНИИЛХ на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства. Регистрационный номер темы – 123022800113-9.

Для цитирования: Карабан А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Парамонов А.А., Цветков И.В. Возрастная динамика биомассы ольхи серой в древостоях Архангельской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 65–75. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-65-75>

Original article

Age Dynamics of Gray Alder Biomass in the Stands of the Arkhangelsk Region

Aleksey A. Karaban^{1,2}✉, Laboratory Research Assistant, Postgraduate Student;

ResearcherID: [HWP-3629-2023](https://orcid.org/0000-0002-2934-0303), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2934-0303>

Vladimir A. Usol'tsev^{3,4}, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [M-8253-2018](https://orcid.org/0000-0003-4587-8952),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4587-8952>

Sergey V. Tret'yakov^{1,2}, Chief Research Scientist, Doctor of Agriculture, Prof.;

ResearcherID: [AAE-3861-2021](https://orcid.org/0000-0001-5982-3114), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5982-3114>

Sergey V. Koptev^{1,2}, Chief Research Scientist, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABD-5497-2021](https://orcid.org/0000-0002-5402-1953), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

*Andrey A. Paramonov*¹, Research Scientist, Candidate of Agriculture;

ResearcherID: [ABH-7242-2020](https://orcid.org/0000-0002-0961-221X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-221X>

Il'ya V. Tsvetkov^{1,2}, Senior Research Scientist, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAV-6441-2021](https://orcid.org/0000-0002-1559-3254), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1559-3254>

¹Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; karaban@sevniilh-arh.ru✉, s.v.tret'yakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru, a.paramonov@sevniilh-arh.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

²Northern (Arctic) Federal University Named after M.V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; karaban@sevniilh-arh.ru✉, s.v.tret'yakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru, i.tsvetkov@narfu.ru

³Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru

⁴Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; Usoltsev50@mail.ru

Received on May 14, 2023 / Approved after reviewing on August 16, 2023 / Accepted on August 19, 2023



This is an open access article distributed under the CC BY 4.0 license

Abstract. The assessment of forest productivity in forestry and forest ecology has a long tradition, but in recent decades there has been a paradigm shift: the target function of forestry, consisting in wood cultivation, has shifted towards the biosphere-stabilizing function and the assessment of biomass and carbon sequestration capacity of forests. Equations and tables for assessing biomass at the stand level have an advantage as they can be used to characterize both the biomass of individual stands and their totality, as well as (when combined with the state forest inventory data) the situations in the forests throughout the country. The complexity of the work on assessing biomass of trees and stands has prompted researchers to use the existing tables of growth progress when compiling the tables of biological productivity of the stands using the recursive method. For the conditions of the northern and middle taiga of the Arkhangelsk Region, there are no tables of growth progress for gray alder biomass. The aim of this research is to study the growth progress of gray alder biomass in the stands of the Arkhangelsk Region. A series of sample plots has been laid to assess the above-ground biomass of the trees of this species. Based on the actual data from 50 model trees from 30 sample plots, the allometric models of the dependence of biomass fractions on the stem volume have been developed. The obtained models have been combined with the tables of growth progress for gray alder by quality class and the table of biological productivity of the species for the conditions of the Arkhangelsk Region has been drawn up. The results have been compared with the data on the biological productivity of gray alder in Belarus, Lithuania and Latvia. It has been shown that the biomass of the mature stands of gray alder of the 1st and 2nd quality classes in the Arkhangelsk Region is 3–9 % less than in Belarus and Lithuania. For the stands of the third and fourth classes, this difference increases to 29–48 %. Such differences in the biomasses of the compared regions can be explained by different zonal site conditions.

Keywords: gray alder, table of growth progress of the stands, table of biological productivity, tree biomass, stand biomass, biomass fraction, allometric model, the Arkhangelsk Region

Acknowledgements: The publication was prepared based on the results of the research effort carried out within the framework of the state assignment of the Northern Research Institute of Forestry for conducting applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency. The topic ID no. 123022800113-9.

For citation: Karaban A.A., Usol'tsev V.A., Tret'yakov S.V., Koptev S.V., Paramonov A.A., Tsvetkov I.V. Age Dynamics of Gray Alder Biomass in the Stands of the Arkhangelsk Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 65–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2 65-75>

Введение

Оценка продуктивности лесов в лесном хозяйстве и лесной экологии проводится давно, но за последние десятилетия произошло смещение целевой функции лесоводства – выращивания древесины – в сторону биосферно-стабилизирующей функции, оценки биомассы и углерододепонирующей способности лесов [15]. Уравнения и таблицы для характеристики биомассы на уровне древостоя учитывают его таксационную структуру. Они могут быть применены для отдельных древостоев и их совокупности, а также, при совмещении с данными государственного учета лесного фонда, стать вкладом в общую оценку состояния лесов страны [9–11]. Однако прямая оценка биомассы в полевых условиях очень сложна и трудозатратна по сравнению с

определением запаса стволовой древесины [17]. Поэтому на начальном этапе составления моделей и таблиц биологической продуктивности древостоев подбирали возрастные ряды пробных площадей по типам леса и для определения фракционного состава биомассы на каждой из них по срубленным модельным деревьям и данным перечета всех деревьев рассчитывали запасы биомассы на 1 га. Это, по сути, были возрастные наборы статических состояний для показателей биопроductивности древостоев, не отражающие фактическую возрастную динамику биомассы и не учитывающие комплекс экологических и ценологических условий роста древостоев. Таблицы биологической продуктивности получали путем расчета регрессионных моделей биомассы в зависимости от возраста и других таксационных показателей древостоев [2, 12–14, 19–21].

Начиная с XIX в. составлено множество таблиц хода роста (ТХР) древостоев по запасу стволовой древесины. Трудоемкость работ по оценке биомассы деревьев и древостоев побудила исследователей к составлению таблиц биологической продуктивности древостоев с использованием существующих ТХР древостоев по запасу стволовой древесины [7, 16]. Корректное совмещение фактических данных о биомассе деревьев и древостоев с традиционными ТХР обеспечивается, когда исходные данные о биомассе получены в широком диапазоне не только возраста древостоев, но и для каждого возраста – в широком диапазоне классов бонитета, а в пределах каждого класса бонитета – в широком диапазоне густоты, что соответствует принципам планирования пассивного эксперимента [8].

На начальном этапе составления таблиц биологической продуктивности породы, для которой есть ТХР, но отсутствуют какие-либо данные о фактической биомассе деревьев и древостоев, совмещение получаемых данных о биомассе (обычно в небольшом количестве) с ТХР выполняется по упрощенной методике. Она заключается в том, что вначале рассчитываются аллометрические модели биомассы дерева в зависимости от его таксационных показателей, затем модели табулируются по средним значениям названных показателей ТХР, и результаты умножаются на соответствующее число стволов из ТХР [5, 18].

Ольха серая одна из лесобразующих пород Архангельской области и произрастает на площади 46,6 тыс. га (Лесной план Архангельской области Российской Федерации на 2019–2028 гг.: утв. указом Губернатора Архангельской области от 14 дек. 2018 г. № 116-у). По данным лесоустройства, вид встречается почти во всех лесничествах Архангельской области, но больше всего в Архангельском, Онежском, Приозерном, Шенкурском, Вельском, Нянском и Каргопольском. Традиционные места произрастания ольхи серой – поймы рек, ручьев и озер. Она интенсивно заселяет и бывшие сельскохозяйственные земли, полосы отвода автомобильных дорог. Ранее были опубликованы таблицы биологической продуктивности ольхи серой, совмещенные с традиционными ТХР, для условий Белоруссии, Латвии и Литвы, а также для модальных древостоев крупнотравно-таволгового типа леса на Среднем Урале [7]. Для других регионов России в ареале произрастания ольхи серой, в т. ч. для Архангельской области, ТХР по биомассе вида отсутствуют.

Цель работы – исследование хода роста по биомассе ольхи серой в древостоях Архангельской области и составление таблиц биологической продуктивности сероольшаников для условий данного региона.

Задачи:

заложить серию пробных площадей для оценки надземной биомассы деревьев ольхи серой и построить аллометрические модели зависимости ее биомассы от таксационных характеристик;

совместить полученные модели с ТХР ольхи серой по классам бонитета и построить таблицу биологической продуктивности сероольшаников для условий Архангельской области;

выполнить сравнительный анализ полученных результатов с данными о продуктивности ольхи серой в других регионах.

Объекты и методы исследования

Полевой материал получали в течение 2020 и 2021 гг., с июня по сентябрь, на территории лесничеств Приморского, Красноборского и Каргопольского районов Архангельской области. Заложены 175 пробных площадей и обработаны 193 модельных дерева. Пробные площади закладывали в соответствии с ОСТ 56-69-83 «Площади пробные лесоустroительные». Характеристика пробных площадей была приведена ранее [6]. При обработке модельных деревьев использовали принятые в лесной таксации методы [1]. По диаметрам в коре на относительных высотах для каждого модельного дерева по 10 секциям вычисляли объем ствола по сложной формуле среднего сечения. По объемам стволов в коре устанавливали старое видовое число для характеристики формы ствола. На относительных высотах измеряли прирост диаметра по пятилетиям. На основе собранных данных разработаны ТХР ольхи серой. Диапазон высот при соответствующем диаметре был взят по материалам пробных площадей и обмеренным модельным деревьям. Полученные ТХР ольхи серой были опубликованы ранее [6].

Для определения фракционного состава надземной биомассы из 175 пробных площадей использовано 30, на которых взято и обработано по методике [8] 1–4 модельных дерева. Каждый из 10 обмеренных отрезков ствола взвешен. В целях установления массы древесины и коры с торцов отрезков взяты диски толщиной 1–3 см. Ветви взвешивали с облиственными побегами и без них. По разности результатов 2 взвешиваний определяли массу облиственных побегов. Массу листвы из средней части кроны фиксировали путем взвешивания примерно 1 кг навески побегов до и после отделения листвы. По разности результатов 2 взвешиваний устанавливали массу листвы и полученное соотношение массы листвы и скелета ветвей использовали при расчете массы листвы и скелета ветвей всего дерева. Затем взвешивали с точностью 0,1 г навески листвы и скелета ветвей массой по 30–50 г. Образцы древесины и коры, а также навески листвы и скелета ветвей сушили в термостате при температуре 105 °С до постоянной массы и повторно взвешивали. В итоге для каждого модельного дерева получены объемы ствола в коре и без коры, а также массы древесины и коры ствола, листвы и ветвей (скелета ветвей). Полная информация о биомассе модельных деревьев опубликована ранее [3], а статистическая характеристика отдельных показателей дана в табл. 1.

Таблица 1

**Статистическая характеристика исходных данных 50 модельных деревьев
ольхи серой с определением надземной биомассы**
**Statistical characteristics of the initial data of 50 model gray alder trees
with the assessment of the above-ground biomass**

Статистический показатель	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>V</i>	<i>P_с</i>	<i>P_{к.с}</i>	<i>P_в</i>	<i>P_л</i>	<i>P_н</i>
Среднее значение	28	7,7	11,3	0,029	12,0	0,9	1,8	0,3	14,2
Минимальное значение	20	3,6	8,8	0,004	1,4	0,1	0,2	0,05	2,0
Максимальное значение	50	16,9	15,1	0,148	44,6	4,8	9,0	1,3	51,5
Стандартное отклонение	7,0	2,6	1,8	0,028	11,6	0,9	1,9	0,3	13,4
Коэффициент вариации, %	25,0	34,5	15,5	95,3	97,0	98,9	102,3	85,1	95,0

Примечание: *A*, *D*, *H* – соответственно возраст (лет), диаметр ствола на высоте груди (см), высота дерева (м); *V* – объем ствола в коре, м³; *P_с*, *P_{к.с}*, *P_в*, *P_л*, *P_н* – соответственно биомасса ствола в коре, коры ствола, ветвей, листьев, надземная в абсолютно сухом состоянии, кг.

Обработка экспериментального материала выполнена в программе Statgraphics-19.

Результаты исследования и их обсуждение

По исходным данным, характеристика которых дана в табл. 1, было рассчитано несколько вариантов аллометрических моделей, структура которых обсуждалась ранее [5, 18]. Однако возраст и линейные размеры дерева в аллометрических моделях для большинства фракций оказались незначимыми на уровне вероятности $p < 0,05$, и критерий Стьюдента для каждого из регрессионных коэффициентов a_1 и a_3 варьировал в диапазоне $t = 0,1-1,8$, что меньше стандартного значения $t_{0,5} = 1,96$.

В результате рассчитаны модели общего вида (табл. 2):

$$P_i = a_0 + a_1 V,$$

где P_i – биомасса i -й фракции.

Таблица 2

**Характеристика моделей зависимости биомассы фракций ольхи серой
от объема ствола**
**Characteristics of the models of dependence of the biomass of gray alder fractions
on the stem volume**

Фракция	Модель	R ²
Древесина ствола	$P_c = 639,55V + 0,9655$	0,875
Кора ствола	$P_{к.с} = 91,98V + 0,4109$	0,573
Ветви с корой	$P_v = 43,16V + 0,1946$	0,686
Листья	$P_l = 58,77V + 0,2505$	0,828

Примечание: R² – коэффициент детерминации.

Далее путем табулирования моделей (табл. 2) по средним объемам ствола из ТХР ольхи серой [6] с последующим умножением результата на соответствующую густоту по ТХР сформирована таблица биологической продуктивности древостоев (табл. 3).

Таблица 3

Биологическая продуктивность ольхи серой в условиях Архангельской области по классам бонитета
Biological productivity of gray alder in the conditions of the Arkhangelsk Region by quality classes

Возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Густота, тыс. шт./га	Запас стволовой древесины в коре, м ³ /га	Надземная фитомасса, т/га				
					ствол		ветви	листья	всего
					древесина	кора			
<i>Ia класс</i>									
5	3,7	2,0	14 907	13	4,27	0,66	0,24	0,14	5,32
10	7,9	5,2	4907	46	15,12	2,34	0,86	0,49	18,81
15	11,4	9,1	2424	92	30,24	4,67	1,72	0,98	37,62
20	14,5	12,9	1590	148	48,64	7,52	2,77	1,58	60,52
25	17,1	16,3	1215	207	68,03	10,52	3,87	2,22	84,64
30	19,4	19,1	1009	263	86,44	13,36	4,92	2,81	107,54
35	21,4	21,4	871	311	102,22	15,80	5,82	3,33	127,17
40	23,1	23,3	762	345	113,39	17,53	6,46	3,69	141,07
45	24,7	24,8	660	359	117,99	18,24	6,72	3,84	146,79
50	26,0	26,0	552	348	114,38	17,68	6,51	3,72	142,30
<i>I класс</i>									
5	2,6	1,2	33 611	9	2,96	0,46	0,17	0,10	3,68
10	5,4	3,0	11 999	29	9,53	1,47	0,54	0,31	11,86
15	8,1	5,4	5459	57	18,73	2,90	1,07	0,61	23,31
20	10,7	8,2	2963	87	28,59	4,42	1,63	0,93	35,57
25	13,0	11,0	2258	141	46,34	7,16	2,64	1,51	57,65
30	15,2	13,8	1793	200	65,73	10,16	3,74	2,14	81,78
35	17,1	16,5	1447	252	82,82	12,80	4,72	2,70	103,04
40	18,8	18,9	1158	289	94,98	14,68	5,41	3,09	118,17
45	20,3	21,1	890	296	97,29	15,04	5,54	3,17	121,03
50	21,7	23,1	694	292	95,97	14,84	5,47	3,12	119,40
<i>II класс</i>									
5	2,5	1,0	44 585	8	2,63	0,41	0,15	0,09	3,27
10	4,9	2,3	17 608	23	7,56	1,17	0,43	0,25	9,41
15	7,0	4,7	6399	45	14,79	2,29	0,84	0,48	18,40
20	9,0	7,1	3688	72	23,66	3,66	1,35	0,77	29,44
25	10,9	9,5	2605	103	33,85	5,23	1,93	1,10	42,12
30	12,5	11,6	2056	137	45,03	6,96	2,56	1,47	56,02
35	14,1	13,5	1732	172	56,53	8,74	3,22	1,84	70,33

Окончание табл. 3

Возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Густота, тыс. шт./га	Запас стволовой древесины в коре, м ³ /га	Надземная фитомасса, т/га				
					ствол		ветви	листья	всего
					древесина	кора			
<i>II класс</i>									
40	15,5	15,2	1517	206	67,71	10,47	3,86	2,20	84,23
45	16,7	16,6	1358	236	77,57	11,99	4,42	2,53	96,50
50	17,8	17,9	1229	262	86,11	13,31	4,90	2,80	107,13
55	18,9	19,0	1114	281	92,36	14,28	5,26	3,01	114,90
<i>III класс</i>									
5	2,3	0,9	40 637	6	1,97	0,31	0,11	0,06	2,45
10	3,9	1,7	28 651	18	5,92	0,91	0,34	0,19	7,36
15	5,6	3,2	11 818	34	11,18	1,73	0,64	0,36	13,90
20	7,3	5,4	5907	57	18,73	2,90	1,07	0,61	23,31
25	8,9	7,3	3890	78	25,64	3,96	1,46	0,83	31,89
30	10,4	9,2	2755	100	32,87	5,08	1,87	1,07	40,89
35	11,9	11,0	2038	118	38,78	6,00	2,21	1,26	48,25
40	13,2	12,8	1560	133	43,71	6,76	2,49	1,42	54,38
45	14,4	14,6	1256	149	48,97	7,57	2,79	1,59	60,93
50	15,6	15,9	1083	163	53,57	8,28	3,05	1,74	66,65
55	16,7	17,2	930	173	56,86	8,79	3,24	1,85	70,74
60	17,7	18,1	785	170	55,87	8,64	3,18	1,82	69,51
<i>IV класс</i>									
5	2,0	0,8	48 336	5	1,64	0,25	0,09	0,05	2,05
10	3,6	1,1	51 262	13	4,27	0,66	0,24	0,14	5,32
15	5,1	2,4	16 154	24	7,89	1,22	0,45	0,26	9,81
20	6,5	4,0	7700	38	12,49	1,93	0,71	0,41	15,54
25	7,9	5,8	4510	53	17,42	2,69	0,99	0,57	21,67
30	9,1	7,5	3160	69	22,68	3,51	1,29	0,74	28,21
35	10,2	9,4	2270	85	27,94	4,32	1,59	0,91	34,76
40	11,3	11,2	1748	100	32,87	5,08	1,87	1,07	40,89
45	12,2	13,0	1380	114	37,47	5,79	2,13	1,22	46,61
50	13,1	14,3	1181	125	41,08	6,35	2,34	1,34	51,11
55	14,0	15,6	1000	132	43,38	6,71	2,47	1,41	53,97
60	14,7	17,0	823	135	44,37	6,86	2,53	1,44	55,20
65	15,5	18,0	693	133	43,71	6,76	2,49	1,42	54,38
70	16,1	19,1	555	124	40,75	6,30	2,32	1,33	50,70

Полученную таблицу биологической продуктивности ольхи серой Архангельской области мы сравнили по показателю надземной биомассы с таблицами биологической продуктивности нормальных древостоев ольхи серой Белоруссии, Литвы и Латвии [7] возрастом 50 лет по соответствующим классам бонитета. Различие наших данных с таблицей для Белоруссии составило в дре-

востоях I, II и III классов бонитета соответственно –7, –3 и –29 %, с таблицей для Литвы в древостоях Ia, I, II и III классов бонитета – соответственно –9, –6, +7 и –48 % и с таблицей для Латвии в древостоях I, II и III классов бонитета – соответственно –31, –25 и –41 %. Таким образом, биомасса спелых древостоев ольхи серой Архангельской области I–II классов бонитета меньше, чем древостоев тех же классов бонитета Белоруссии и Литвы, на 3–9 %, в древостоях III–IV классов бонитета различие возрастает до 29–48 %. Это соответствует известной закономерности, что «в лучших условиях произрастания спелость наступает раньше, чем в худших, а долговечность в бореальной зоне снижается по направлению с севера на юг» [4, с. 4]. В целом подобные различия биомассы в сравниваемых регионах можно объяснить неодинаковыми зональными условиями произрастания.

Заключение

Впервые в условиях северной тайги Архангельской области получены данные о структуре надземной биомассы ольхи серой и рассчитаны аллометрические модели зависимости каждой фракции от объема ствола. Путем совмещения моделей с ранее составленной таблицей хода роста древостоев составлена таблица биологической продуктивности древостоев ольхи серой по классам бонитета. Сравнение нашей таблицы с показателями нормальных древостоев ольхи серой Белоруссии, Литвы и Латвии выявило, что биомасса спелых древостоев ольхи серой I–II классов бонитета в Архангельской области меньше, чем в Белоруссии и Литве, для древостоев III–IV классов бонитета это различие еще больше. Такие результаты можно объяснить несходными зональными условиями произрастания древостоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гусев И.И. Моделирование экосистем. Архангельск: АГТУ, 2002. 112 с.
Gusev I.I. *Ecosystem Modeling*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 112 p. (In Russ.).
2. Иванов А.В., Усольцев В.А., Цепордей И.С., Касаткин А.С. Сравнительный анализ биомассы кедровых и дубовых древостоев Приморья в контексте биоразнообразия // Хвойные бореал. зоны. 2023. Т. 41, № 1. С. 38–45.
Ivanov A.V., Usoltsev V.A., Tsepordey I.S., Kasatkin A.S. Comparative Analysis of *Pinus koraiensis* S. ex Z. and *Quercus mongolica* F. ex L. Stand Biomass on Primorye in the Context of Biodiversity. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2023, vol. 41, no. 1, pp. 38–45. <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-1-38-45>
3. Карaban А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Парамонов А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Цепордей И.С. Биомасса деревьев ольхи серой и ее аллометрические модели в условиях Архангельской области // Леса России и хоз-во в них. 2023. № 2. С. 42–50.
Karaban A.A., Usoltsev V.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Paramonov A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Tsepordey I.S. Biomass of Gray Alder Trees and its Allometric Models in the Conditions of the Arkhangelsk Region. *Lesa Rossii i khozyajstvo v nikh = Forests of Russia and Economy in Them*, 2023, no. 2, pp. 42–50. (In Russ.). <http://doi.org/10.51318/FRET.2023.36.20.005>
4. Лебедев А.В., Кузьмичев В.В. Таксационные показатели сосновых древостоев по данным долговременных наблюдений // Сиб. лесн. журн. 2023. № 2. С. 3–16.

Lebedev A.V., Kuzmichev V.V. Forest Survey Parameters of Pine Tree Stands according to Long-Term Observation Data. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2023, no. 2, pp. 3–16. (In Russ.).

5. Парамонов А.А., Усольцев В.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Цветков И.В., Давыдов А.В., Цепордей И.С. Таблица хода роста по фитомассе ивняков Архангельской области // Сиб. лесн. журн. 2023. № 2. С. 33–39.

Paramonov A.A., Usoltsev V.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Tsvetkov I.V., Davydov A.V., Tsepordey I.S. Yield Table of Willow Stands' Phytomass of Arkhangelsk Oblast. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2023, no. 2, pp. 33–39. (In Russ.).

6. Третьяков С.В., Коптев С.В., Карабан А.А., Парамонов А.А., Давыдов А.В. Возрастная динамика нормальных древостоев ольхи серой в таежной зоне северо-востока европейской части России // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 6. С. 70–80.

Tretyakov S.V., Koptev S.V., Karaban A.A., Paramonov A.A., Davydov A.V. Age Dynamics of Normal Gray Alder Stands in the Taiga Zone of the North-East of the European Part of Russia. *Lesnoy zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 6, pp. 70–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-6-70-80>

7. Усольцев В.А. Фитомасса лесов Северной Евразии: нормативы и элементы географии. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 762 с.

Usoltsev V.A. *Forest Biomass of Northern Eurasia: Mensuration Standards and Geography*. Yekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 2002. 762 p. (In Russ.).

8. Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.

Usoltsev V.A. *Biological Productivity of Northern Eurasia's Forests: Methods, Datasets, Applications*. Yekaterinburg, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 2007. 636 p. (In Russ.).

9. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Пряжников А.А. Методы определения депонирования углерода фитомассы и нетто-продуктивности лесов (на примере Республики Беларусь) // Лесоведение. 2003. № 1. С. 48–57.

Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Pryazhnikov A.A. Methods for Determination of Carbon Accumulation in Phytomass and Net Productivity of Forests (by the Example of Stands in Republic of Belarus). *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2003, no. 1, pp. 48–57. (In Russ.).

10. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. № 1. С. 69–92.

Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Carbon Budget of Russian Forests. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2014, no. 1, pp. 69–92. (In Russ.).

11. Щепашенко Д.Г., Швиденко А.З., Пергер К., Дресел К., Фриц Ш., Лакида П.И., Мухортова Л.В., Усольцев В.А., Бобкова К.С., Осипов А.Ф., Мартыненко О.В., Карминов В.Н., Онтиков П.В., Щепашенко М.В., Кракнер Ф. Изучение фитомассы лесов: текущее состояние и перспективы // Сиб. лесн. журн. 2017. № 4. С. 3–11.

Schepashchenko D.G., Shvidenko A.Z., Perger K., Dresel C., Fritz S., Lakyda P.I., Mukhortova L.V., Usoltsev V.A., Bobkova K.S., Osipov A.F., Martynenko O.V., Karminov V.N., Ontikov P.V., Shchepashchenko M.V., Krahner F. Forest Biomass Observation: Current State and Prospective. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2017, no. 4, pp. 3–11. (In Russ.).

12. Albrektson A. Relations between Tree Biomass Fractions and Conventional Silvicultural Measurements. *Ecological Bulletins*, 1980, no. 32, pp. 315–327.

13. González-García M., Hevia A., Majada J., Calvo de Anta R., Barrio-Anta M. Dynamic Growth and Yield Model Including Environmental Factors for *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden Short Rotation Woody Crops in Northwest Spain. *New Forests*, 2015, vol. 46, pp. 387–407. <http://doi.org/10.1007/s11056-015-9467-7>

14. Nicoulaud-Gouin V., Gonze M.-A., Hurtevent P., Calmon P. Bayesian Inference of Biomass Growth Characteristics for Sugi (*C. japonica*) and Hinoki (*C. obtusa*) Forests in Self-Thinned and Managed Stands. *Forest Ecosystems*, 2021, vol. 8, art. no. 75. <http://doi.org/10.1186/s40663-021-00354-4>
15. Parresol B.R. Assessing Tree and Stand Biomass: a Review with Examples and Critical Comparisons. *Forest Science*, 1999, vol. 45, iss. 4, pp. 573–593. <https://doi.org/10.1093/forestscience/45.4.573>
16. Pretzsch H. *Forest Dynamics Growth and Yield: From Measurement to Model*. Heidelberg, Springer Berlin, 2009. 664 p. <http://doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4>
17. Sah J.P., Ross M.S., Koptur S., Snyder J.R. Estimating Aboveground Biomass of Broadleaved Woody Plants in the Understory of Florida Keys Pine Forests. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 203, iss. 1–3, pp. 319–329. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.059>
18. Usoltsev V.A., Vanclay J.K. Stand Biomass Dynamics of Pine Plantations and Natural Forests on Dry Steppe in Kazakhstan. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1995, vol. 10, iss. 1–4, pp. 305–312. <http://doi.org/10.1080/02827589509382897>
19. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Chasovskikh V.P. Triple Harmonization of Transcontinental Allometric of *Picea* spp. and *Abies* spp. Forest Stand Biomass. *Ecology, Environment and Conservation*, 2018, vol. 24, no. 4, pp. 1966–1972.
20. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Chasovskikh V.P. Additive Allometric Model of *Quercus* spp. Stand Biomass for Eurasia. *Ecological Questions*, 2020, vol. 31, no. 2, pp. 39–46. <http://doi.org/10.12775/EQ.2020.012>
21. Usoltsev V.A., Shobairi S.O.R., Ahrari A., Zhang M., Chasovskikh V.P. Prediction of Allometric Models of Stand Biomass of *Betula* sp. in Eurasia. *Indian Journal of Ecology*, 2020, vol. 47, iss. 2, pp. 517–522.

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

Научная статья
УДК 630*232.11
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-76-89

Архивы клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Республике Карелия

Н.В. Лаур¹, д-р с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAL-1770-2021](https://orcid.org/0009-0007-5733-1379),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5733-1379>

А.П. Царев², д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [S-6639-2019](https://orcid.org/0000-0001-8019-0016),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>

В.А. Царев^{2,3}, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [ABE-5600-2020](https://orcid.org/0000-0002-3921-9339),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>

Р.П. Царева², канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [AAK-2110-2021](https://orcid.org/0000-0002-6949-4665),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>

¹Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия, 185910; laur@petsu.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, ул. Ломоносова, д. 105, г. Воронеж, Россия, 394087; antsa-55@yandex.ru[✉], tsarais42@mail.ru, vad.tsareff@yandex.ru

³Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; vad.tsareff@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.02.23 / Одобрена после рецензирования 26.05.23 / Принята к печати 04.06.23

Аннотация. Архивы клонов плюсовых деревьев закладывают для сохранения их генотипов, генотип каждого такого дерева уникален, и его потеря невосполнима. В архивах проводят научные наблюдения, в частности – отбор клонов для лесосеменных плантаций повышенной генетической ценности (ЛСП-I,5). Цель статьи – изучить динамику создания, сохранения и состояния архивов клонов в России в целом и в Республике Карелии в частности. На 2019 г. в РФ существовало 31 514 плюсовых деревьев, а архивы клонов занимали площадь 573,6 га, или на 17 % меньше, чем в 1976 г. В Республике Карелии, несмотря на 40%-е списание плюсовых деревьев, на 01.01.2023 г. числилось 1486 их экземпляров, включая 1110 шт. самой ценной лесной породы – сосны обыкновенной. В архивах клонов растет только 12,8 % потомств этого вида (8,4 % от всех отобранных 1695 плюсовых деревьев сосны). Для полноценного архива клонов (1695 шт. потомств плюсовых деревьев сосны) требуется дополнительно посадить 38,9 га (в двух повторностях – 81,3 га) деревьев. В первую очередь нужно создать архивы клонов сосны обыкновенной из плюсовых деревьев, которые значатся в реестре Республики Карелии на 2023 г. (1110 шт.). В этом случае площадь дополнительной посадки составит 52 га. К настоящему времени селекционная инвентаризация лесов в России и регионах, в т. ч. в Карелии, выполнена частично, т. е. и отбор плюсовых деревьев, учитывая огромный размер лесопокрытой площади, проведен также в ограниченном масштабе. Между тем именно плюсовые насаждения, плюсовые деревья и созданные их клоновым потомством лесосеменные плантации (ЛСП-I) являются выборкой лучшего фенотипического генофонда основных лесобразующих пород как субъектов РФ, так и страны в целом. Но названные объекты со временем стареют, погибают, вырубаются. Не всегда лучшие

экземпляры могут сохраниться даже в лесосеменных и маточных плантациях. Постоянная вырубка лесов, снижение возраста рубки и естественное старение аттестованных плюсовых деревьев обуславливают необходимость возобновления систематического отбора материала в лучших приспевающих насаждениях Республики, особенно ее северной и центральной частей, и выращивания лучших деревьев в архивах клонов в виде клонового потомства. В настоящей статье показана важность архивов клонов для сохранения ценного генофонда лесных древесных растений и их использования даже в случае исчезновения плюсовых деревьев в местах отбора и регистрации.

Ключевые слова: архив клонов, сосна обыкновенная, плюсовые деревья, сохранность деревьев, состояние деревьев, рост деревьев, лесосеменные плантации, маточные плантации, Республика Карелия

Для цитирования: Лаур Н.В., Царев А.П., Царев В.А., Царева Р.П. Архивы клонов плюсовых деревьев сосны обыкновенной в Республике Карелия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 76–89. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-76-89>

Original article

The Archives of Clones of Scots Pine Plus Trees in the Republic of Karelia

*Natal'ya V. Laur*¹, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAL-1770-2021](https://orcid.org/0009-0007-5733-1379), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5733-1379>

*Anatoliy P. Tsarev*², Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [S-6639-2019](https://orcid.org/0000-0001-8019-0016),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-0016>

Vadim A. Tsarev^{2,3}, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ABE-5600-2020](https://orcid.org/0000-0002-3921-9339), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3921-9339>

*Raisa P. Tsareva*², Candidate of Agriculture, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [AAK-2110-2021](https://orcid.org/0000-0002-6949-4665), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-4665>

¹Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation; laur@petsu.ru

²All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, ul. Lomonosova, 105, Voronezh, 394087, Russian Federation; antsa-55@yandex.ru[✉], tsarais42@mail.ru, vad.tsareff@yandex.ru

³Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; vad.tsareff@yandex.ru

Received on February 4, 2023 / Approved after reviewing on May 26, 2023 / Accepted on June 4, 2023

Abstract. Archives of clones (ACs) of plus trees (PTs) are laid to preserve their genotypes. The genotype of each plus tree is unique, and its loss is irreplaceable. In addition, scientific observations are carried out in the archives, in particular, the selection of clones for forest seed orchards (FCOs) of increased genetic value (FSO-I,5). The aim of this research has been to study the dynamics of creating and preserving the archives of clones, as well as their state, in Russia in general and in the Republic of Karelia in particular. As of 2019 there were 31,514 plus trees in the Russian Federation, and the archives of clones covered an area of 573.6 ha, or 17 % less than in 1976. In the Republic of Karelia, despite discarding 40 % of them, as of 01.01.2023, there were 1,486 plus trees, including 1,100 trees of the most valuable forest species – Scots pine. Only 12.8 % of the progeny of this species grow in the archives

of clones (8.4 % of a total of 1,695 selected Scots pine plus trees). For a full-fledged archive of clones (1,695 pcs. of the progeny of Scots pine plus trees), it is required to additionally plant 38.9 ha (in two repetitions – 81.3 ha) of trees. First of all, it is necessary to create the archives of clones of Scots pine from the plus trees listed in the register of the Republic of Karelia as of 2023 (1,110 pcs.). In this case, the area of additional planting will be 52 ha. To date, the selection inventory of forests in Russia as a whole and its regions, including the Republic of Karelia, has been partially completed, i.e. the selection of plus trees, considering the huge size of forested area, has also been carried out to a limited extent. Meanwhile, it is the plus plantations, plus trees and forest seed orchards created by their clone progeny that are a sample of the best phenotypic gene pool of the main forest-forming species, both in the regions of the RF and in the country as a whole. But over time these objects are aging, dying and being cut down. The best specimens may not always be preserved even in forest seed orchards and matrix plantations (MPs). Constant deforestation, a decrease in the age of felling, and the natural aging of certified plus trees necessitate the resumption of systematic selection of plus trees in the best ripening plantations of the Republic, especially its northern and central parts, and the cultivation of the best trees in the archives of clones in the form of clone progeny. This article indicates the importance of clone archives for preserving the valuable gene pool of forest woody plants and their use even in the event of the disappearance of plus trees in the places of selection and registration.

Keywords: archive of clones, Scots pine, plus trees, preservation of trees, condition of trees, tree growth, forest seed orchards, matrix plantations, the Republic of Karelia

For citation: Laur N.V., Tsarev A.P., Tsarev V.A., Tsareva R.P. The Archives of Clones of Scots Pine Plus Trees in the Republic of Karelia. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 76–89. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-76-89>

Введение

Селекция лесных древесных пород направлена на выделение и использование лучших генотипов растений. В настоящее время отечественные и зарубежные селекционеры в качестве практически ценных рассматривают генотипы плюсовых деревьев (ПД). За рубежом издано много фундаментальных работ по данной проблеме. Среди них можно отметить публикации в Швеции: Ö. Danell [17], B. Lindquist [18], O. Rosvall et al. [20] и др.; в Германии: Э. Ромедера, Г. Шёнбаха [9]; во Франции: D. More, J.White [19]; в Польше [16] и других странах. Среди отечественных исследователей назовем таких авторов прошлого века, как А.В. Альбенский, А.С. Яблоков, М.М. Вересин и др. [1, 3, 15]. В текущем столетии появились исследования Н.Н. Бессчетновой и др., В.В. Тараканова и др., А.П. Царева и др., Ю.А. Гопиуса и др. [2, 4, 10, 12, 13].

Генотип каждого ПД уникален, и его потеря невосполнима. Для длительного сохранения ПД многие селекционеры предлагают использовать архивы клонов (АК). В АК проводят научные наблюдения, подбирают клоны для лесосеменных плантаций повышенной генетической ценности (ЛСП-I,5). Селекционная инвентаризация лесов во всей России и ее отдельных регионах, в т. ч. в Карелии, выполнена частично, т. е. и отбор ПД, учитывая огромный размер лесопокрытой площади, проведен также в ограниченном масштабе. Между тем именно плюсовые насаждения, ПД и созданные их клоновым потомством ЛСП являются выборкой лучшего генофонда основных лесобразующих пород как субъектов РФ, так и всей ее территории.

ПД утрачиваются по ряду причин: при рубках, пожарах, стихийных бедствиях, строительстве дорог и прокладке линий электропередач, отсутствии документации, невозможности найти дерево в натуре. С ПД проводится заготовка черенков для прививочных работ, поэтому деревья ослаблены и в большей степени подвержены воздействию фито- и энтомофитовредителей. ПД могут списать «за ненадобностью», что нередко и происходит, т. к. в настоящее время ЛСП в стране практически не закладывают. Производственники не видят в ПД необходимости, арендаторы могут вырубить ПД, плюсовые насаждения и генетические резерваты, не зная их ценности.

Цель настоящей публикации – проанализировать динамику создания, сохранения и состояния АК в России в целом и в Республике Карелии в частности. При этом основное внимание уделено одному из ценных лесных древесных видов – сосне обыкновенной.

Объекты и методы исследования

При анализе создания, сохранности и состояния АК в СССР и России использовались открытые источники информации.

Закладка АК сосны обыкновенной в Республике Карелии проводилась при личном участии одного из авторов настоящей публикации (Н.В. Лаур) во время функционирования Карельского селекционно-семеноводческого центра. После его расформирования в 2008 г. натурные обследования осуществлялись в период учебных практик студентов Петрозаводского государственного университета. При проведении инвентаризаций устанавливали сохранность, состояние и динамику роста после посадки деревьев, а затем измерения проводили периодически.

Сохранность учитывали путем подсчета реально сохранившихся растений в АК. Высоты измеряли в первые годы шестом, а впоследствии – финским высотомером Suunto. Диаметры на высоте 1,3 м фиксировали мерной лентой, полученные результаты пересчитывали в необходимые показатели. Данные сводили в табличный формат.

Результаты исследования и их обсуждение

Массовый отбор ПД в стране проводили с начала 70-х гг. прошлого века, когда активно закладывали укрупненные ЛСП-1. Динамика отбора ПД, создания АК и маточных плантаций (МП) начиная с 1996 г. отражены в табл. 1–3. В РФ на 2019 г. числилась 31 514 ПД, в основном сосны и ели, АК занимали 573,6 га (табл. 1).

Таблица 1

Динамика объектов единого генетико-селекционного комплекса в РФ в 1996–2019 гг.
Dynamics of objects of the unified genetic and breeding complex
in the Russian Federation in 1996–2019

Объект	Год			
	1996 [13]	2007 [5]	2013*	2019 [12]
ПД, шт.	35 000	36 631	35 065	31 514
АК, га	689,0	570,0	598,4	573,6
МП, га	Н. д.	Н. д.	208,0	186,0

Примечание: Н. д. – нет данных. * – по данным «Рослесинфорга» (Лесной реестр 2013).

Некоторые данные динамики закладки АК в России приведены в табл. 2. Как видно из этой таблицы, на 2007 г. было 569,9 га АК. Причины списания объектов при инвентаризации 2006–2007 гг. следующие: несоответствие предъявляемым требованиям и отсутствие документации, в т. ч. схем размещения клонов (39,9 га/37,6 %), а также усыхание растений, болезни, неправильный подбор площади, повреждение лосями и грызунами, пожары, паводки. Породный состав и площадь АК и МП указаны в табл. 3.

Таблица 2

Наличие АК и МП в России в 1996–2019 гг.
The availability of the ACs and MPs in Russia in 1996–2019

Год учета*	АК, га/%	МП, га/%	Аттестованных МП, га/%
1996 г.	689,0	Н. д.	Н. д.
2006 г. (инвентаризация 2006–2007 гг.), в т. ч.: обследовано	689,0 685,2/100	300,9/100 Н. д.	Н. д.
списано	106,2/16	58,3	Н. д.
подлежат реконструкции	9,1/1	12,5	Н. д.
2008 г. (инвентаризация 2006–2007 гг.)	569,9/83	221,1	Н. д.
2012 г.	588,9	222,6	178,3/81
2013 г.	598,4	208,0	Н. д.
2019 г.	573,6	186,0	Н. д.
Списано за 1996–2018 гг.	115,4/17	Н. д.	Н. д.
Списано за 2007–2018 гг.	Н. д.	114,4/38	Н. д.

*По состоянию на 1-е января.

Таблица 3

Площадь АК и МП по породам в России
(по данным «Рослесозащиты» 2007 и 2012 г.), га/%
The area of the ACs and MPs in Russia by species
(according to the Russian Centre of Forest Health, 2007 and 2012), ha/%

Породы	АК, 2007 г.	АК, 2012 г.	МП, 2012 г.
Хвойные, в т.ч. сосна обыкновенная	529,7/93 302,0/5,0	544,3/9 310,8/52,8	216,9/96 128,9/56,9
Лиственные	40,3/7	44,6/8	9,6/4
<i>Итого</i>	570,0/100	588,9/100	226,6/100

По результатам Всероссийской инвентаризации селекционных объектов 2006–2007 гг., в РФ числилось, без учета ранее списанных, 36 631 ПД. Для сохранения такого количества клонового потомства ПД (40 клонов на 1 га, по 10 рамет от клона) потребовалось бы заложить 915,8 га АК по всем породам в одной повторности. Но, т. к. АК – объекты длительного сохранения генотипов лучших деревьев страны, для гарантии они должны быть созданы в двух повторностях, т. е. на площади в 1831,6 га. В 2007 г. в стране было 570,0 га АК, т. е. 62,2 % в одной повторности и 31,1 % в двух повторностях от потребности. Потомство всех ПД, включая списанные в разные годы, растет на ЛСП. В связи с этим оно должно быть полностью представлено и в АК.

В 2019 г. в РФ после текущих списаний числилось 31 514 ПД всех пород. Соответственно, АК, хотя бы включенные в реестр ПД, должны иметь площадь

787,85 га в одной повторности, их фактическая площадь на указанный период – 573,6 га, что составляет 72,7 % от потребности. В двух повторностях необходимая общая площадь АК для всех пород – 1575,7 га, т. е. дополнительно требуется заложить АК на площади 1002,1 га.

По интенсивности отбора ПД РФ значительно отстает от ряда других стран Северного полушария. Можно привести следующие сравнительные данные. В Финляндии на 2012 г. было отобрано 20 793 ПД на лесной площади страны в 22,2 млн га. В Канаде при площади лесов 397 262 тыс. га отобрано 55 105 ПД, а в банки клонов (АК), площадь которых составляет 120 га, включено 26 608 ПД [8, 12, 14].

За период существования в Карелии двух производственных лесосеменных станций и селекционно-семеноводческого центра (1972–2008 гг.) их сотрудниками проводились активные работы по отбору ПД, созданию ЛСП-I и АК. Такая деятельность была несколько интенсивнее, чем по стране в целом. В Республике за прошедшие 50 лет аттестовано 2503 ПД, в т. ч. сосны – 1695 шт. (табл. 4). Потомство ПД сосны представлено на 6 ЛСП Карелии.

Таблица 4

Отбор и списание ПД в Карелии
The selection of PTs and their discarding in Karelia

Породы	Аттестовано, шт.*	Списано, шт./%**	На 01.01.2023 г.	
			шт.	последний год отбора
Всего,	2503	1017/40,6	1486/59,4	2007
в т. ч. сосна обыкновенная	1695	585/34,5	1110	2005
другие породы	808	432/53,4	376	1980–2007

*1965–2005 гг. **В 1990, 2006, 2007, а также при ежегодных инвентаризациях.

После расформирования Карельского селекционно-семеноводческого центра отбор ПД сосны последние 17 лет не осуществлялся, зато деревья регулярно списывались: на 01.01.2023 г. списано 1017 ПД (40,6 %), в т. ч. сосны – 585 шт. (34,5 %).

В Карелии институтом «Союзгипролесхоз» в 1973–1976 гг. запроектировано создание 4 укрупненных ЛСП, на территории каждой из них планировалась закладка АК в одной повторности. Общая проектная площадь АК – 19,7 га, в т. ч. сосны обыкновенной – 10,3 га. На 2023 г. в Республике числится два АК общей площадью 8 га (в т. ч. сосны – 5,5 га), заложенных на Петрозаводской и Олонецкой ЛСП. Поскольку АК Олонецкой ЛСП не соответствует требованиям, ниже приводятся сведения только по Петрозаводскому АК сосны обыкновенной.

Проектная площадь Петрозаводского АК – 5,9 га, в т. ч. сосны – 4,3 га [11]. На 01.01.2023 г. посажено, сохранилось и официально числится 4 га, в т. ч. сосны – 3,5 га (рис. 1), ели и карельской березы – 0,5 га. В 1983–1996 гг. (табл. 5) осуществлена рядовая посадка сосны по схеме 5×5 м, по 10 рям от одного клона. На каждом гектаре размещено по 40 клонов ПД.

В Карелии за 50 лет аттестовано 1695 ПД сосны, в АК растет 142 их клоновых потомства (8,4 %). На 01.01.2023 г. в Республике числится 1110 ПД сосны. Даже если считать только внесенные в реестр на 01.01.2023 г. клоны ПД, то в АК сохранено 12,8 % клонов. Общее количество посаженных в АК прививок – 1530 шт. Живых из них – 1177 шт. при средней приживаемости 77 %.



Рис. 1. АК сосны обыкновенной. Петрозаводская ЛСП, посадка 1983 г. Фото 2022 г.

Fig. 1. The AC of Scots pine. Petrozavodsk FSO, planted in 1983. The photo taken in 2022

Таблица 5

**Посадка АК сосны обыкновенной на Петрозаводской ЛСП по годам
(данные 2006* г.)**

Planting the AC of Scots pine in Petrozavodsk FSO by years (the data from 2006*)

Год посадки	Площадь, га	Количество клонов, шт.	Год посадки	Площадь, га	Количество клонов, шт.
1983	0,4	15	1990	0,3	12
1984	0,2	8	1991	0,3	12
1985	0,6	22	1994	0,2	10
1986	0,2	8	1995	0,2	11
1987	0,2	8	1996	0,5	20
1988	0,2	8	<i>Всего</i>	3,5	142
1989	0,2	8			

*Год последней инвентаризации.

По данным последней инвентаризации (2006 г.), 100%-я сохранность прививок наблюдалась у 39 клонов (26 % от общего количества), потребность в 10–40%-м дополнении была у 89 клонов (64 %), у 14 клонов (10 %) приживаемость составила от 20 до 50 %. На 2023 г. эти данные требуют корректировки. АК нуждается в дополнении.

Что касается представленности клонов ПД в АК, то на долю южной Карелии приходится 79 % потомств, центральной – 5 %, северной – 16 % (по лесосеменному районированию 1982 г.) [5]. По лесосеменному районированию 2015 г. (приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 08.10.2015 г. № 353 «Об установлении лесосеменного районирования»), Карелия при протяженности с севера на юг в 660 км относится по сосне и ели к одному лесосеменному району.

АК – сложные для создания объекты, т. к. посадка на них может вестись только постепенно, по мере заготовки черенков с ПД. Площадь АК недостаточна, в то же время для лесного семеноводства необходимо сохранить все генотипы ПД. Возникает вопрос – можно ли считать клоновые ЛСП и МП одновременно АК? Теоретически можно, но практически – далеко не всегда, т. к. цели их создания и схемы посадки разные.

В Карелии созданы 6 ЛСП-I, первый год посадки – 1975. Проекты 4 укрупненных ЛСП разработаны институтом «Союзгипролесхоз» (1973–1976 гг., срок действия проектов 30–40 лет). Посадка ЛСП сосны первоначально проводилась по 20-клоновой (ОСТ 56-74–84. «Плانتации лесосеменные сосны, ели, лиственницы и дуба»), а с 1996 г. – по 50-клоновой (ОСТ 56-74–96 «Плانتации лесосеменные основных лесобразующих пород. Основные требования») блочной схеме. Учитывая в среднем 5-летнюю периодичность заготовки черенков с ПД, различное количество рамет в клоне (в зависимости от приживаемости при проведении прививочных работ) и 20%-е дополнение в несколько сроков, схемы теряют предусмотренную блочной посадкой «стройность».

Рассмотрим конкретный пример, показывающий, насколько сложными могут быть схемы даже при более простом 20-клоновом смешении. Исходные данные следующие: год посадки – 1983, площадь участка ЛСП – 1,04 га (на рис. 2 – фрагмент площадью 0,7 га), схема посадки 8×5 м, посадочных мест – 250 шт./га. Приживаемость прививок, по последней инвентаризации, составила 93 %, количество клонов – 94 шт. Первоначально посадки были сильно повреждены лосем, т. к. изгородь отсутствовала, дополнение проводилось 3 раза. Маркировка прививок частично утрачена к 2008 г. Примерно такая же ситуация на всех 6 ЛСП.

448	53	876	866	523	32	900	815	795	38	805	396	795	779
657	32	510	62	1092	835	780	–	107	31	804	–	578	651
516	835	–	92	1086	573	60	1078	651	–	900	899	516	31
522	644	60	109	1094	522	63	849	508	835	644	62	112	818
59	528	63	110	59	–	12	106	358	–	60	114	108	103
262	515	36	358	512	–	1084	110	59	962	63	106	59	651
512	32	510	62	516	835	849	505	107	515	513	110	107	38
508	835	–	657	508	354	60	62	856	575	510	505	516	528
522	656	–	109	522	861	105	849	358	850	780	864	112	1002
59	528	645	110	59	515	515	106	578	353	60	114	1083	103
–	997	36	505	360	866	510	110	59	528	63	106	992	353
–	32	510	262	516	864	780	505	107	6	876	110	995	838
–	835	504	849	508	354	876	62	516	853	510	989	516	993

Рис. 2. Схема инвентаризации прививок сосны обыкновенной (приведенные числа – номера клонов) после проведения дополнения. На 1 га – 94 клона. Петрозаводская ЛСП, поле № 3, общей площадью 10 га

Fig. 2. The inventory scheme of Scots pine grafting after the supplement. 94 clones per 1 ha. Petrozavodsk FSO, field no. 3 (the numbers given are clone numbers, the field area is 10 ha)

Учитывая общее количество аттестованных ПД сосны (1695 шт.), значительную площадь 6 ЛСП этого вида (354,4 га, 88,5 тыс. посадочных мест), сложность и многоклоновость схем после проведения дополнений (табл. 6) и, главное, отсутствие полной маркировки прививок уже к 2008 г., можно сделать вывод: клоновые плантации и АК создаются с разной целью и не являются взаимозаменяемыми.

Таблица 6

Представленность клонов ПД сосны обыкновенной на 3 ЛСП Карелии*
The representation of clones of Scots pine PTs in three Karelian FSOs

Показатель	ЛСП		
	Петрозаводская	Заонежская	Ладвинская
Площадь, га	132,0	47,4	7,4
Количество клонов, шт.	806	553	166
Доля клонов от общего числа ПД, %	50	33	10

*Приводятся данные по 3 из 6 ЛСП [7].

Идентификацию ПД или рамет на ЛСП в спорных случаях можно выполнить по анализу ДНК. Для участка площадью 1,04 га в стоимость работ войдут: заготовка хвой с 94 ПД, сбор хвой с прививок на ЛСП, определение соответствия ДНК материнских ПД и рамет. С нашей точки зрения, в большом объеме подобные работы невыполнимы как из-за сложности, так и из-за затратности и длительности исполнения. Проще провести дополнение АК перепрививкой, а новые создать прививкой непосредственно с ПД.

Преимуществом АК по сравнению с ЛСП является надежность схем при рядовой посадке. Случайные ошибки при посадке достаточно легко установить, т. к. у всех рамет одного клона одинаковые морфологические признаки: цвет мужских и женских стробиллов (рис. 3, б); размер, форма и цвет шишек, форма апофиза (рис. 3, а) и др.

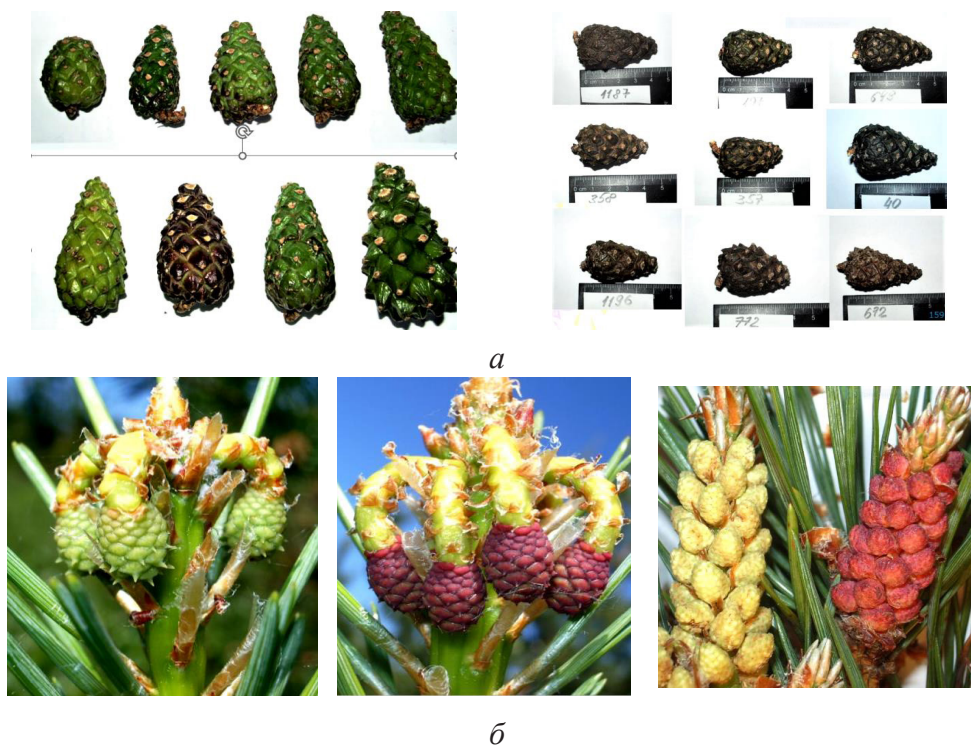


Рис. 3. Формовое разнообразие: а – шишек сосны; б – мужских и женских стробиллов сосны по цвету. Петрозаводская ЛСП, АК сосны. Фото 2005 г.

Fig. 3. The diversity of: а – pine cones; б – male and female pine strobili by color. Petrozavodsk FSO, the AC of Scots pine. Photos taken in 2005

МП только частично могут заменить АК, при условии, что у прививок не проведена обрезка кроны и заготовка черенков не была интенсивной (табл. 7). Цель создания АК – не только сохранение лучших генотипов всех ПД, но и проведение научных наблюдений. В Карелии с 1984 по 2008 гг. в АК сотрудниками Петрозаводской лесосеменной станции Карельского селекционно-семеноводческого центра и Петрозаводского государственного университета выполнялись следующие научно-исследовательские работы:

лесопатологическое обследование (устойчивость к вредителям и болезням) [6];

определение пороков [6];

фенотипические наблюдения: урожайность клонов; размер шишек, их особенности (цвет, средний вес, форма шишек и апофиза) – см. рис. 3, а;

исследование стробиллов: цвет и размер макростробиллов (красный, зеленый и переходный оранжевый) и микростробиллов (желтый, бледно-розовый, розовый) – см. рис. 3, б;

контролируемое опыление прививок сосны для получения гибридных семян и сеянцев [13].

Эти исследования позволяют по комплексу признаков идентифицировать каждый клон и выявлять ошибки при посадке, а также провести подбор клонов для будущих ЛСП-1,5.

Таблица 7

Основные различия между АК и МП

The major differences between the AC and the MP

Показатель	АК	МП
Цель использования	Сохранение генотипов ПД, научные наблюдения	Заготовка черенков для прививок
Количество клонов ПД	Все отобранные	Часть клонов
Количество повторностей	2	1
Место посадки	Не на территории ЛСП	На ЛСП
Посадка	Рядовая	
Обрезка кроны	Не проводится	Возможна

В целом, по нашему мнению, сохранение всех ПД в виде клонового потомства должно проводиться в специализированных АК. Именно в них удобно и надежно выполнять необходимые наблюдения, вести предварительную выбраковку худших клонов (с низкой и нестабильной урожайностью, нестандартными и засмоленными шишками, заболеваниями и пр.) и отбирать лучшие для создания ЛСП-1,5.

Итак, сформулируем основные положения по результатам исследования. Нельзя планировать повышение производительности лесов, производство семян с улучшенными наследственными свойствами (и переход к ЛСП-1,5 и ЛСП-II), увеличение запасов насаждений к возрасту спелости, сокращение сроков достижения технической спелости насаждений, не имея соответствующей базы. В основе плюсовой селекции, принятой в лесном хозяйстве России, рассматриваются ПД. Без АК, являющихся основой для дальнейших селекционных работ, есть риск потерять лучший лесной генофонд страны, т. к. АК созданы частично, а ПД и плюсовые насаждения стабильно списывают.

Часть аттестованных ПД раньше отбирали в спелых и даже перестойных насаждениях, в настоящее время прослеживается тенденция снижения возраста главной рубки (в южной Карелии – с 81 года), т. е. необходимо изменить требования к отбору ПД по возрасту – вести его в приспевающих насаждениях. Отбор ПД в средневозрастных насаждениях преждевременен, т. к. в каждой группе возраста свои лидеры. Согласно отчету о результатах контрольного мероприятия «Аудит эффективности мер по воспроизводству лесов в Российской Федерации за 2019–2020 гг.», ежегодно в стране сплошные вырубki проводятся на площади 1,1 млн га, а занесенные в реестр ПД стареют. Имеет смысл возобновить ежегодный плановый отбор ПД, откорректировав предъявляемые к ним требования. Это непросто, ведь даже для отобранных ПД в РФ полная площадь АК всех пород в двух повторностях – 1,8 тыс. га. В 2007 г. их было 0,57 тыс. га, т. е. 31 % от потребности. За последующие 12 лет площадь АК увеличилась на 3,6 га, т. е. прирастала по 0,3 га в год по всей стране.

Для Республики Карелии основных причин запущенности объектов лесосеменной базы и документации две:

1) Расформирование в 2008 г. Карельского селекционно-семеноводческого центра. То есть в настоящее время нет и специалистов-селекционеров, соответственно, такие работы, как инвентаризация, маркировка, дополнение ЛСП и АК и др., требующие специальных знаний и опыта, проводить некому.

2) Финансовые сложности. Можно предположить, что трудности этого плана существуют и в других регионах страны. Следовало бы пересмотреть затраты в сторону более рационального использования денежных средств.

В проектах «Союзгипролесхоза» 1973–1976 гг. предусмотрена закладка коллекционно-маточных участков в 1–2-й годы создания укрупненных ЛСП, что нереально. Коллекционно-маточные участки должны были выполнять роль АК ПД и одновременно МП – с 6–7-летнего возраста на указанных участках планировалась заготовка черенков для прививочных работ. Учитывая, что в годы создания ЛСП посадка сосны прививками в Карелии доходила до 40 га в год, а объем прививочных работ составлял около 20 тыс. прививок, заготовку черенков проводили непосредственно с ПД и только изредка в небольших объемах – на коллекционно-маточных участках (их в дальнейшем стали называть АК).

По проектам планировалось заложить 4 АК сосны общей площадью 10,3 га, на которых поместилось бы клоновое потомство 412 ПД. При этом имелось в виду, что периодичность заготовки черенков с каждого ПД – 3–5 лет, а схемы смешения по ОСТ 56-74-84 «Плانتации лесосеменные сосны, ели, лиственницы и дуба» – 20-клоновые. Фактически в Карелии периодичность заготовки черенков составляла обычно 5 лет, объем заготовки – 100–120 черенков с 1 дерева (в противном случае кроны не успевали оправиться). С введением ОСТ 56-74-96 «Плانتации лесосеменные основных лесобразующих пород. Основные требования» посадку повели по 50-клоновым схемам смешения. Кроме 4 укрупненных, заложили еще 2 ЛСП сосны площадью 45,5 га. Потребность в ПД постоянно увеличивалась, их отбор осуществляли ежегодно, соответственно, проектная площадь АК отстала от потребности.

Всего в Республике было отобрано 1695 ПД сосны обыкновенной, клоновое потомство практически всех деревьев произрастает на 6 ЛСП. В расчете на это количество площадь АК сосны должна составлять 42,4 га в одной повторности. На 01.01.2023 г. всего числится 5,5 га АК сосны, из них

соответствует требованиям только 3,5 га, на которых представлено потомство 142 ПД (8,4 % от общего количества). Для полноценного АК (для 1695 потомств ПД сосны) требуется дополнительно посадить 38,9 га, в двух повторностях – 81,3 га. В первую очередь нужно создать АК тех ПД, которые числятся в реестре Республики Карелии на 01.01.2023 г. (1110 шт.), в этом случае площадь дополнительной посадки в одной повторности составит 24,25 га. Самый надежный способ, позволяющий избежать ошибок, – провести заготовку черенков для прививок непосредственно с ПД. Частично можно заготовить черенки для прививочных работ с семенных деревьев на ЛСП при условии надежности натурной маркировки и компетентности исполнителей. Но, учитывая, что инвентаризация и маркировка ЛСП не проводятся длительное время, результат труднопредсказуем.

В Карелии клоновые ЛСП не способны полноценно заменить АК. Основные причины следующие. Потомство ПД сосны растет на 6 ЛСП, общая площадь полей – 353,4 га, это 88 тыс. посадочных мест. Плантации создавались с 1975 г., на них представлено потомство почти 1,7 тыс. ПД сосны обыкновенной. Схемы смешения клонов, особенно с учетом неоднократных дополнений, чрезвычайно сложные, натурная маркировка не обновлялась. Неизбежны ошибки и при посадках.

Последняя инвентаризация АК сосны в Карелии проведена в 2006 г. На этот период сохранность клонов – 100 %, приживаемость рамет – 77 %. АК нуждается в обновлении маркировки и дополнении. Видимо, самый простой путь – перепрививка.

Учитывая то, что идет постоянная вырубка лесов, снижается возраст рубки, а аттестованные ПД стареют, было бы целесообразно возобновить систематический отбор ПД в лучших приспевающих насаждениях Республики, особенно ее северной и центральной частях, и сохранить деревья в АК в виде клонового потомства.

Заключение

Плюсовые деревья являются одной из основ естественного происхождения улучшенного генетического фонда, используемого для практических целей. Но они со временем стареют, погибают, вырубаются. Не всегда лучшие деревья могут быть сохранены даже в лесосеменных и маточных плантациях.

Один из надежных способов сохранения плюсовых деревьев – архивы клонов, в которых не меняются исходные генетические качества отобранных фенотипов. За последние десятилетия площади архивов клонов в Российской Федерации в целом и в Республике Карелии в частности не только не увеличились, а наоборот, значительно снизились. Примерные расчеты показали, что в РФ необходимо для сохранения отобранных плюсовых деревьев 1,8 тыс. га архивов клонов, в Республике Карелии только сосны – 38,9 га, а в двух повторностях – 81,3 га. По официальным данным, в РФ числится 0,57 тыс. га архивов клонов, а в Республике Карелии – только 8 га, в т. ч. сосны обыкновенной – 5,5 га, из которых требованиям соответствует 3,5 га.

Для исправления сложившейся ситуации необходимо разработать «Новое положение о развитии лесной генетики и селекции в стране», восстановить и вновь создать региональные селекционные центры. Учитывая, что в условиях специальной военной операции средства на полную перестройку ограничены, необходимо хотя бы их более рациональное использование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Альбенский А.В. Селекция древесных пород и семеноводство. М.; Л.: Гослесбу-миздат, 1959. 306 с.

Al'bensky A.V. *Breeding of Wood Species and Seed Production*. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1959. 306 p. (In Russ.).

2. Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Оганян Т.А. Таксационные показатели вегетативного потомства плюсовых деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в архивах клонов в Нижегородской области // Экономические аспекты развития АПК и лесного хозяйства союзного государства России и Белоруссии: материалы междунар. науч.-практ. конф., Нижний Новгород, 28 сент. 2019 г. / под общ. ред. Н.Н. Бессчетновой. Н. Новгород: НГСХА, 2019. С. 115–122.

Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Oganyan T.A. Taxational Indicators of Vegetative Offspring of Scots Pine Plus Trees (*Pinus sylvestris* L.) in the Archives of Clones in the Nizhny Novgorod Region. *Economic Aspects of the Development of the Agro-Industrial Complex and Forestry of the Union State of Russia and Belarus: Materials of the International Scientific and Practical Conference (September 28, 2019)*. Ed. by N.N. Besschetnova. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Agriculture Academy Publ., 2019, pp. 115–122. (In Russ.).

3. Вересин М.М., Ефимов Ю.П., Арефьев Ю.Ф. Справочник по лесному селекционному семеноводству. М.: Агропромиздат, 1985. 245 с.

Veresin M.M., Efimov Yu.P., Aref'yev Yu.F. *Handbook of Forest Breeding Seed Production*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 245 p. (In Russ.).

4. Гопиус Ю.А., Казанцева Е.В., Коровин В.В., Корчагов С.А., Лаур Н.В., Мелехов В.И., Николаева Н.В., Погиба С.П., Робакидзе Е.А., Романовский М.Г., Румянцев Д.Е. Селекционная инвентаризация насаждений и пороки древесины // Продукционный процесс и структура деревьев, древесин и древостоев: моногр. Успенское (Моск. обл.): ИЛ РАН, 2006. Деп. в ВИНИТИ 14.06.06, № 792-В2006. С. 28–43.

Gopius Yu.A., Kazantseva E.V., Korovin V.V., Korchagov S.A., Laur N.V., Melekhov V.I., Nikolaeva N.V., Pogiba S.P., Robakidze E.A., Romanovskiy M.G., Rumyantsev D.E. Selection Inventory of Forest Stands and Flaws in Wood. *The Production Process and Structure of Trees, Woods and Stands: Monograph*. Uspenskoye (Moscow Reg.), Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences Publ., 2006. Deposited manuscript in the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information on 14.06.06, no. 792-v 2006, pp. 28–43. (In Russ.).

5. Лаур Н.В. Лесная селекция и семеноводство в Карелии: моногр. М.: МГУЛ, 2012. 160 с.

Laur N.V. *Forest Breeding and Seed Production in Karelia: Monograph*. Moscow, MSFU Publ., 2012. 160 p. (In Russ.).

6. Лаур Н.В., Горбунова В.Н. Лесопатологическое состояние лесосеменных плантаций Карелии // Изв. лесоинж. фак.: сб. науч. тр. ПетрГУ. Петрозаводск, 2006. Деп. в ВИНИТИ 21.07.06, № 984-В2006. С. 64–69.

Laur N.V., Gorbunova V.N. Forest Pathology of Karelian Forest Seed Orchards. *Proceedings of the Faculty of Forestry Engineering: Collection of Scientific Works of PetrSU*. Petrozavodsk, 2006. Deposited manuscript in the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information on 21.07.06, no. 984-v 2006, pp. 64–69. (In Russ.).

7. Рабочий проект реконструкции ЛСП-I в Петрозаводском лесхозе Республики Карелия. М.: Росгипролес, 2003. С. 16–89.

Detailed Design of the Reconstruction of FSO-I in Petrozavodsk Forestry of the Republic of Karelia. Moscow, Rosgiproles Publ., 2003, pp. 16–89. (In Russ.).

8. Раевский Б.В., Игнатенко Р.В., Новичонок Е.В., Прокопюк В.М., Куклина К.К. Современное состояние селекции и семеноводства хвойных пород // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 6. С. 9–37.

Raevsky B.V., Ignatenko R.V., Novichonok E.V., Prokopiuk V.M., Kuklina K.K. The Current State of Conifer Species Breeding and Seed Production. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 6, pp. 9–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-6-9-37>

9. Ромедер Э., Шёнбах Г. Генетика и селекция лесных пород. М.: Изд-во с.-х. лит., журн. и плакатов, 1962. 268 с.

Rohmeder E., Schönbach H. *Genetik und Züchtung der Waldbäume = Genetics and Breeding of Forest Species*. Trans. from German. Moscow, Selkhozizdat Publ., 1962. 268 p. (In Russ.).

10. Тараканов В.В., Паленова М.М., Паркина О.В., Роговцев Р.В., Третьякова Р.А. Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор) // Лесохоз. информ. 2021. № 1. С. 100–143.

Tarakanov V.V., Palenova M.M., Parkina O.V., Rogovtsev R.V., Tretyakova R.A. Forest Tree Breeding in Russia: Achievements, Challenges, Priorities (Overview). *Lesokhozyaystvennaya informatsiya = Forestry information*, 2021, no. 1, pp. 100–143. (In Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2021.1.09>

11. Техно-рабочий проект Петрозаводской укрупненной лесосеменной плантации. М.: ВГПИИ «Союзгипролесхоз», 1973–1974. 172 с.

Detailed Contract Design of Petrozavodsk Enlarged Forest Seed Orchard. Moscow, All-Union State Design and Research Institute «Soyuzgiproleskhoz», 1973–1974. 172 p. (In Russ.).

12. Царев А.П., Лаур Н.В., Царев В.А., Царева Р.П. Современное состояние лесной селекции в Российской Федерации: тренд последних десятилетий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 6. С. 38–55.

Tsarev A.P., Laur N.V., Tsarev V.A., Tsareva R.P. The Current State of Forest Breeding in the Russian Federation: the Trend of Recent Decades. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 6, pp. 38–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-6-38-55>

13. Царев А.П., Лаур Н.В., Щурова М.Л. Состояние и проблемы развития постоянной лесосеменной базы в Республике Карелия // Тр. лесоинж. фак. ПетрГУ. 1996. Вып. 1. С. 100–103.

Tsarev A.P., Laur N.V., Shchurova M.L. The State and Problems of the Development of a Permanent Forest Seed Base in the Republic of Karelia. *Proceedings of the Faculty of Forestry Engineering: Collection of Scientific Works of PetrSU*, 1996, iss. 1, pp. 100–103. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.1996.2377>

14. Царев А.П., Погиба С.П., Лаур Н.В. Генетика лесных древесных растений. 2-е изд. М.: МГУЛ, 2013. 381 с.

Tsarev A.P., Pogiba S.P., Laur N.V. *Genetics of Forest Woody Plants*. 2nd ed. Moscow, MSFU Publ., 2013. 381 p. (In Russ.).

15. Яблоков А.С. Селекция древесных пород. М.: Сельхозиздат, 1962. 487 с.

Yablokov A.S. *Forest Tree Breeding*. Moscow, Selkhozizdat Publ., 1962. 487 p. (In Russ.).

16. *Biologia Sosny Zwyczajnej = Biology of Common Pine*. Ed. by S. Bialoboka, A. Boratynskeg, I.W. Bugaly. Poznan–Kornik, 1993. 624 p. (In Pol.).

17. Danell Ö. Survey of Past, Current and Future Swedish Forest Tree Breeding. *Silva Fennica*, 1991, vol. 25, no. 4, art. no. 5463, pp. 241–247. <https://doi.org/10.14214/sf.a15621>

18. Lindquist B. *Forstgenetik in Schwedischen Waldbaupraxis = Forest Genetics in Swedish Forestry Practice*. Radebene und Berlin: Neumann Verlag, 1954. 156 p. (In Ger.).

19. More D., White J. *Encyclopédie des Arbres = Encyclopedia of Trees*. Paris, Flammarion, 2013. 831 p. (In French).

20. Rosvall O., Almqvist C., Lindgren D., Mullin T. Breeding Strategies. *Review of the Swedish Tree Breeding Programmes*. Sweden, Uppsala, Skogforsk, 2011, pp. 55–56.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

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

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

Научная статья
УДК 634.0.18:631.4
DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-90-104

Изменения дерново-подзолистой почвы в лесных культурах лиственницы европейской за длительный период

А.Б. Лысиков¹, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; ResearcherID: [IUP-5414-2023](https://orcid.org/0009-0005-6355-2691),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6355-2691>

П.Г. Мельник^{1,2}, канд. с.-х. наук, доц., ст. науч. сотр.;
ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

М.Д. Мерзленко¹, д-р с.-х. наук, проф., гл. науч. сотр.;
ResearcherID: [J-1359-2016](https://orcid.org/0000-0002-0887-3178), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

А.В. Колесников¹, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.;
ResearcherID: [J-6922-2018](https://orcid.org/0000-0003-0814-1812), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0814-1812>

¹Институт лесоведения РАН, ул. Советская, д. 21, с. Успенское, Московская обл., Россия, 143030; lysikov@yandex.ru, melnik_petr@bk.ru[✉], md.merzlenko@mail.ru, wheelwrights@mail.ru

²Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; melnik_petr@bk.ru[✉]

Поступила в редакцию 07.04.22 / Одобрена после рецензирования 03.07.22 / Принята к печати 05.07.22

Аннотация. Исследование проведено в лесных культурах лиственницы европейской (*Larix decidua* Mill.) с фиксацией изменений их лесоводственного эффекта и свойств дерново-подзолистой почвы под пологом насаждений более чем за 40-летний период. Цель работы – определить характер изменений морфологических и физико-химических свойств почв под пологом лесных культур лиственницы европейской за длительный период (45 лет) в условиях северо-восточного Подмосковья. Исследованию были охвачены 2 опытных объекта, расположенных в типе условий место-произрастания В₂ (простая свежая суборь), что соответствует соснякам-черничникам свежим. Первый опытный объект, постоянная пробная площадь 46, расположен в искусственном насаждении, созданном в 1871 г. методом посадки; второй, В-2, – в лесных культурах, созданных в 1870 г. посевом. На протяжении всего периода изучения лесные культуры росли по Ia классу бонитета и существенно повысили запас стволовой древесины. В лесных культурах пробной площади 46 запас увеличился на 470 м³/га (текущий прирост в течение 42 лет наблюдений составил 11,2 м³/га в год), а в культурах на пробной площади В-2 – на 417 м³/га (текущий прирост за 41 год – 10,2 м³/га в год). Это свидетельствует об отсутствии на данный момент распада в искусственных древостоях: они успешно функционируют до полуторавекового возраста. За 45 лет изменились морфологические и физико-химические свойства почвы. Установлено снижение содержания илистой фракции, особенно в верхней части почвенного профиля. Увеличились актуальная, обменная и гидролитическая кислотности почвы как показатели процесса подзолообразования. При этом возросли мощность лесной подстилки, содержание гумуса в гумусово-элювиальной толще, емкость поглощения, содержание обменных оснований и степень насыщенности основаниями, особенно в верхних горизонтах почвы, гидролитическая кислотность. В целом за 45-летний срок под пологом лесных культур лиственницы европейской не отмечено значительного ухудшения свойств дерново-подзолистых почв и даже наблюдаются тенденции улучшения некоторых показателей.

Ключевые слова: лиственница европейская, *Larix decidua* Mill., лесные культуры, динамика компонентов биоценоза, лесоводственная характеристика, почвенная характеристика

Для цитирования: Лысиков А.Б., Мельник П.Г., Мерзленко М.Д., Колесников А.В. Изменения дерново-подзолистой почвы в лесных культурах лиственницы европейской за длительный период // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 90–104. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-90-104>

Original article

The Changes in Sod-Podzolic Soil in European Larch Forest Plantations over a Long Period

*Andrey B. Lysikov*¹, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [IUP-5414-2023](https://orcid.org/0009-0005-6355-2691), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6355-2691>

Petr G. Melnik^{1,2}✉, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof., Senior Research Scientist;

ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

*Mikhail D. Merzlenko*¹, Doctor of Agriculture, Prof., Chief Research Scientist;

ResearcherID: [J-1359-2016](https://orcid.org/0000-0002-0887-3178), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0887-3178>

*Aleksandr V. Kolesnikov*¹, Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ResearcherID: [J-6922-2018](https://orcid.org/0000-0003-0814-1812), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0814-1812>

¹Institute of Forest Science of the Russian Academy of Sciences, ul. Sovetskaya, 21, s. Uspenskoye, Moscow Region, 143030, Russian Federation; lysikov@yandex.ru, melnik_petr@bk.ru✉, md.merzlenko@mail.ru, wheelwrights@mail.ru

²Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; melnik_petr@bk.ru✉

Received on April 7, 2022 / Approved after reviewing on July 3, 2022 / Accepted on July 5, 2022

Abstract. The research has been carried out in European larch forest plantations (*Larix decidua* Mill.) with the recording of changes in their silvicultural effect and the properties of sod-podzolic soil under the canopy of plantations over a period of more than 40 years. The aim of this work is to determine the nature of changes in the morphological and physicochemical properties of soils under the canopy of European larch forest plantations over a long period (45 years) in the conditions of the north-eastern Moscow Region. The research has covered 2 sample plots located in the B₂ type of site conditions (simple fresh subor), which corresponds to fresh blueberry pine forests. The first sample plot (permanent sample plot 46) is located in an artificial plantation created in 1871 by planting. As for the second one (permanent sample plot B-2), it is located in forest plantations created in 1870 by sowing. Throughout the entire period of the research, the forest plantations have been growing according to the Ia quality class and have significantly increased the stock of stem wood. In forest plantations of the sample plot 46, the stock increased by 470 m³/ha (the current increase over 42 years of observation has equaled to 11.2 m³/ha per year), and in forest plantations of the sample plot B-2 – by 417 m³/ha (the current increase over 41 years of observations has equaled to 10.2 m³/ha per year). This indicates that there is currently no decay in the cultivated stands: they function successfully up to a century and a half old. Over 45 years, there have been changes in the morphological and physicochemical properties of the soil. A decrease in the

content of the clay fraction has been established, especially in the upper part of the soil profile. The actual, exchange and hydrolytic acidity of the soil have increased as indicators of the ongoing process of podzolization. At the same time, the thicknesses of the forest floor and the humus content in the humus-eluvial layer have risen. The absorption capacity, the content of the exchange bases and the degree of saturation with the bases have increased, especially in the upper horizons of the soil, and the hydrolytic acidity has risen. In general, over a 45-year period, there has been no significant deterioration in the properties of sod-podzolic soils under the canopy of European larch forest plantations, and there are even trends of improvement in some indicators.

Keywords: European larch, *Larix decidua* Mill., forest plantations, dynamics of biocenosis components, silvicultural characteristics, soil characteristics

For citation: Lysikov A.B., Melnik P.G., Merzlenko M.D., Kolesnikov A.V. The Changes in Sod-Podzolic Soil in European Larch Forest Plantations over a Long Period. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 90–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-90-104>

Введение

Лиственница европейская (*Larix decidua* Mill.) в лесокультурной практике на территории центра Русской равнины используется со 2-й половины XIX в. Эта хвойная порода – интродуцент в центре Русской равнины – в лесных культурах формирует быстрорастущие и высокопроизводительные древостои [9, 10, 14, 16–19, 28, 30, 46]. Аналогичные результаты роста и производительности лесных культур в условиях Центральной и Западной Европы получены в посадках лиственницы европейской судетской формы (*L. decidua* Mill. f. *Sudetica*) [32, 33, 35–38, 42, 43, 49]. В указанных регионах эта порода по эксплуатации и возможности разведения является наиболее перспективной [39–41, 48]. Хорошее естественное возобновление лиственницы европейской за пределами ареала распространения говорит об устойчивости и жизнеспособности интродуцента в новых условиях [15, 44, 45]. Явное преимущество в депонировании углерода лиственницей европейской над такой коренной породой, как сосна обыкновенная, которое выражается превышением почти в 2 раза по накопленному углероду, свидетельствует о желательности использования первой в качестве ценного интродуцента для создания лесных культур [20]. Более чем за полтора столетия период лесоводами созданы как чистые по составу насаждения лиственницы, так и смешанные с сосной и елью. К настоящему времени специалистами по лесному почвоведению проведено большое количество исследований по взаимовлиянию хвойных лесов и почв, причем лесов не только естественного происхождения, но и рукотворных, включая лиственничные [2, 4, 7, 8, 12, 13, 21, 26, 27, 29, 34, 47]. Вместе с тем сведений об изменении почв и в первую очередь – их плодородия за длительное время под пологом лиственничных лесных культур до сих пор нет.

Из указанных литературных источников наиболее близки к нашему исследованию 2 работы – М.В. Вайчуса [4] и А.Д. Янушко и К.Л. Забелло [34]. Однако данные изыскания не отражают динамику изменений в плодородии дерново-подзолистых почв за конкретный период времени на одних и тех же участках лиственничных лесных культур. Вместе с тем названные авторы единогласно пришли к выводу, что выращивание насаждений лиственницы спо-

собствует улучшению лесорастительных свойств почв. Аналогичного мнения придерживались такие видные лесоводы, как М.Е. Ткаченко [31] и В.П. Тимофеев [30].

Цель работы – определить характер изменений морфологических и физико-химических свойств почв под пологом лесных культур лиственницы европейской за длительный период (45 лет) в условиях северо-восточного Подмосковья.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено на территории 2 стационарных объектов лесных культур лиственницы европейской судетской формы, произрастающей на Никольской лесной даче (северо-восток Московской области). Объекты характеризуются типом условий местопроизрастания B_2 (простая свежая суборь), что соответствует соснякам-черничникам свежим. В этих лесорастительных условиях нами выбраны 2 постоянные пробные площади (ППП): ППП 46 расположена в искусственном насаждении, заложенном в 1871 г. методом посадки; ППП В-2 – в лесных культурах, созданных в 1870 г. посевом [17]. В начале 70-х гг. XX в. на этих ППП были сделаны почвенные описания, а из генетических горизонтов взяты образцы почвогрунтов для физико-химического анализа. Аналогичные работы выполнены спустя 45 лет.

На опытных объектах проводили инструментальную таксацию в соответствии с ОСТ 56-69–83. В ходе подеревных перечетов и обработки их результатов получены основные таксационные характеристики по 2 ППП: средняя высота, средний диаметр, число стволов, сумма площадей сечений. По взятым в 1973 г. средним модельным деревьям выполнен полный анализ древесного ствола, в т. ч. с определением видового числа [1]. Запас стволовой древесины ($m^3/га$) находили по формуле

$$M = H_{\text{ср}} FG,$$

где $H_{\text{ср}}$ – средняя высота насаждения, м; F – видовое число; G – сумма площадей сечений, $m^2/га$.

Морфологическое описание почв, а также определение физико-химических свойств почвенно-грунтовой толщи осуществлялись согласно общепринятым методикам. Из генетических горизонтов почв на ППП отбирались образцы на исследование их гранулометрического состава пипет-методом Н.А. Качинского [3]. Исследовались некоторые химические показатели: рН водной и солевой вытяжки, количество подвижных фосфора и калия, степень насыщенности основаниями [6], содержание обменного алюминия, гумуса по методу И.В. Тюрина и гидролитическая кислотность [5, 24]. Напочвенный покров характеризовался с указанием главных эдификаторов и индикаторов травянистых растений и мхов.

Результаты исследования и их обсуждение

Изначально лесные культуры лиственницы европейской создавались с примесью сосны обыкновенной, но последняя оказалась не конкурентоспособной по отношению к лиственнице и на сегодняшний день почти не присутствует в составе искусственного древостоя (табл. 1).

Таблица 1

Таксационная характеристика исследованных лиственничных лесных культур
Taxation characteristics of the studied larch forest plantations

Год перечета	<i>A</i>	Ярус	Состав	H_{cp}	D_{cp}	<i>N</i>	<i>G</i>	<i>M</i>
<i>ППП 46</i>								
1972	101	1-й	8Л	31,8	32,9	468	42,20	647
		1-й	2С	30,2	35,9	109	10,80	146
		1-й	+Е	28,5	27,7	40	1,80	44
		2-й	10Е	18,0	16,6	86	3,00	18
<i>Итого</i>						703	57,80	855
2014	143	1-й	9Л	37,0	48,9	337	68,65	1117
		1-й	1С	32,9	48,8	31	5,93	92
		1-й	ед. Е	25,6	37,3	6	0,68	8
		2-й	8Е	14,4	19,9	50	1,62	13
		2-й	2Кл	15,0	18,3	12	0,34	3
<i>Итого</i>						436	77,22	1233
<i>ППП В-2</i>								
1973	103	1-й	9Л	30,3	40,6	396	54,9	834
		1-й	1С	26,5	28,6	98	0,30	78
<i>Итого</i>						494	61,20	912
2014	144	1-й	10Л	37,5	49,1	355	74,57	1277
		1-й	ед. С	32,9	39,2	8	1,02	15
		2-й	10Е	16,1	17,4	8	0,21	2
<i>Итого</i>						371	75,80	1294

Примечание: *A* – возраст, лет; D_{cp} – средний диаметр, см; *N* – число деревьев, шт./га.

Ель (*Picea abies*) в обоих насаждениях, как правило, имеет естественное происхождение и располагается во 2-м ярусе. За последнее 2 десятилетия наблюдается инвазия клена остролистного (*Acer platanoides*), причем на ППП 46 он уже вошел во 2-й ярус. В напочвенном покрове лесных биоценозов стационарных объектов доминируют таежные виды растений и мхов с преобладанием кислицы (*Oxalis acetosella*), черники (*Vaccinium myrtillus*), брусники (*Vaccinium vitis-idaea*) и зеленых мхов.

Более чем за 40 лет в искусственных насаждениях лиственницы европейской произошло колоссальное увеличение запаса стволовой древесины. Так, в лесных культурах ППП 46 запас возрос на 470 м³/га (текущий прирост за 42 года наблюдений составил 11,2 м³/га в год), а в культурах ППП В-2 – на 417 м³/га (текущий прирост за 41 год – 10,2 м³/га в год). Это свидетельство того, что распада в искусственных древостоях пока не происходит: они успешно функционируют.

Теперь рассмотрим изменения морфологических свойств дерново-подзолистой почвы под пологом лиственничных лесных культур на изучаемых объектах за 45-летний период.

Почвенный разрез на ППП 46; 30.10.1972 г.:

A_0 – 0–3 см. Лесная подстилка, серовато-буроватая, влажная, состоит из опада хвои, веточек, травы, листвы, рыхлая, наполовину разложившаяся. Переход постепенный.

A_1 – 3–17 см. Супесчаный, серый, пылевато-комковатый, рыхлый, свежий почвенный горизонт, встречаются корни растений. Переход постепенный (A_2 – небольшими морфонами по границе A_1 – B_1).

B_1 – 17–36 см. Легкий суглинок, желтовато-бурый, пылевато-зернистый, рыхлый, свежий, присутствуют корни растений и марганцевые зерна. Переход постепенный.

B_2 – 36–70 см. Супесчаный, бурый, комковато-ореховатый, плотный, свежий, слоистый горизонт с вкраплениями марганцевых зерен и мелких камешков. Переход заметный.

C – 70–200 см. Песчаный, беловато-серый, рыхлый, свежий горизонт.

Окончательное определение почвы на ППП 46 на момент 1972 г. – дерново-слабоподзолистая супесчаная на песке.

Почвенный разрез на ППП 46; 16.05.2019 г.:

A_0 – 0–6 см. Лесная подстилка, темно-коричневая, влажная, оторфованная, состоящая из опада хвои разной степени разложенности, кусочков коры, веточек, рыхлая, пронизана корнями. Переход ясный, граница ровная.

A_1 – 6–10 см. Темно-серый, супесчаный, комковато-порошистый, свежий, рыхлый почвенный горизонт, масса корней расположена в верхней части слоя, наблюдаются легкие признаки оподзоленности. Переход ясный по цвету и плотности, граница языковатая.

A_2B – 10–17 см. Палево-бурый, с более темными пятнами, свежий, супесчаный, непрочно-комковатый горизонт, отдельные морфоны имеют более выраженную мелкоглыбистую структуру, уплотнен, встречаются черные марганцевые примазки. Переход постепенный по цвету и плотности.

B_1 – 17–40 см. Супесчаный, светло-бурый, комковато-порошистый горизонт, агрегаты непрочные, уплотнен, с отдельными темными и – в большем количестве – рыжими примазками. Переход постепенный по цвету и плотности.

B_2 – 40–60 см. Свежий, плотный, буро-палевый с отдельными более рыжими морфонами горизонт, опесчаненная супесь, структура – мелкоглыбистая. Переход ясный по цвету и плотности.

BC – 60–105 см. Неоднородный по сложению и цвету, в основном мелкопесчаный, темно-рыжий, неясно-комковатый, почти порошистый горизонт, встречаются отдельные плотные ортзанды с кремнеземистой присыпкой по граням структурных отдельностей, железо-марганцевые конкреции, отдельные корни, тонкие прослой отмытого песка, слоистый. Переход постепенный по плотности и наличию включений.

C – 105–140 см и более. Темно-бурый, плотный, свежий горизонт, присутствует глыбистый средний песок с включениями мелкой дресвы.

Окончательное определение почвы участка в 2019 г. – дерново-подзолистая супесчаная на флювиогляциальном песке. При сравнительном морфологическом изучении почв в разрезах, заложенных на ППП 46 в 1972 и 2019 гг., отмечается увеличение мощности лесной подстилки, снижение мощности горизонта A_1 , отчетливое нарастание признаков оподзоливания в верхних горизонтах.

Почвенный разрез на ППП В-2; 21.09.1973 г.:

A_0 – 0–2 см. Лесная подстилка, бурая, свежая, из опада хвои, травы, рыхлая, наполовину разложившаяся.

A_1 – 2–18 см. Легкий суглинок, серо-коричневый, пылевато-комковатый, свежий, присутствуют корни растений. Переход постепенный.

AB – 18–50 см. Горизонт песчаный, слоистый, светло-коричневый, рыхлый, свежий, иногда попадаются мелкие камешки. Переход постепенный.

B – 50–100 см. Песчаный, буро-красноватый, слоистый горизонт, плотнее предыдущего, свежий. Переход заметный.

C – 100 см и более. Песчаный, буро-коричневый, рыхлый почвенный горизонт.

Окончательное определение почвы на участке за 1973 г. – дерново-слабоподзолистая легкосуглинистая на флювиогляциальном отложении.

Почвенный разрез на ППП В-2; 16.05.2019 г.:

A_0 – 0–4 см. Лесная подстилка, светло-бурая, свежая, из опада хвои, остатков осоки, рыхлая, уплотненная, характеризуется обилием корней, в нижней части отмечено большое количество кварцевых зерен.

A_1 – 4–9 см. Горизонт супесчаный, пылеватый, серо-коричневый, неясно-комковатый, свежий, наблюдаются отмытые зерна кварца, обилие корней, отдельные темные примазки в нижней части слоя. Граница языковатая, переход ясный по цвету.

A_2B – 9–25 см. Коричневато-бурый, свежий, слабоуплотненный, супесчаный горизонт с непрочно-комковатой структурой. Отмечены потеки гумуса по корням и ходам червей, марганцевые примазки, редкие железистые пятна. Переход плавный по цвету.

B_1 – 25–53 см. Рыжевато-бурый, свежий, неясно-комковатый, мелкопесчаный с включениями дресвы, рыхлый горизонт. В нижней части встречаются непрочные красно-коричневые ортштейны размером до 10 см, ярко-рыжие пятна. Переход заметный по цвету и плотности, граница волнистая.

BC – 53–95 (100) см. Свежий, мелкопесчаный, рыжевато-палевый, рыхлый горизонт, в нижней части разреза холоднее по оттенку, чем в верхней, мягкий, в верхней части наблюдаются отдельные бурые конкреции. Местами отмечены палевые морфоны со следами оглеения. Переход постепенный.

C – 100–130 см. Свежий, рыхлый, бурый бесструктурный мелкозернистый песок с включениями мелкого щебня, присутствуют ярко-рыжие ортштейны и более светлые пятна (контрастные окислительно-восстановительные условия), конкреции разные по окраске – от ярко-рыжих до холодных палевых.

Окончательное определение почвы ППП В-2 в 2019 г. – дерново-слабоподзолистая супесчаная на флювиогляциальном отложении. За период наблюдений на ППП в 2 раза увеличилась мощность лесной подстилки, существенно уменьшились выраженность гумусово-аккумулятивного горизонта и мощность переходного горизонта к иллювиальной толще. Несовпадение границ горизонтов может быть объяснено неоднородностью строения почвы на ППП. Вместе с тем в оба года исследований горизонт A_2 не выделяется.

Результаты исследований физико-химических свойств почвы на ППП 46 и В-2 представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Гранулометрический состав исследованных почв
Granulometric composition of the studied soils

Горизонт	Глубина взятия образца, см	Содержание гранулометрических фракций (мм), %								
		>3	3–1	1– 0,5	0,5– 0,25	0,25– 0,05	0,05– 0,01	0,01– 0,005	0,005– 0,001	<0,001
<i>ППП 46 (1972)</i>										
A ₀	0–3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
A ₁	5–15	0,6	0	–	32,4	30,3	23,3	4,0	5,6	4,4
B ₁	20–30	–	0	–	27,1	16,0	36,3	9,0	6,7	4,9
B ₂	40–60	–	0	–	32,8	20,5	30,2	5,8	5,2	5,5
C	80–160	0,3	4,5	–	42,4	48,3	1,7	0,8	0,4	1,9
<i>ППП 46 (2019)</i>										
A ₁	6–10	0,6	0,9	10,4	31,6	21,7	19,5	5,9	4,3	5,1
A ₂ B	10–17	0,5	0,9	15,4	34,1	9,5	25,1	3,8	5,6	5,0
B ₁	17–40	0,4	0,9	16,6	22,4	12,5	30,8	5,7	5,7	5,2
B ₂	40–60	2,4	1,1	13,6	25,9	15,6	27,2	4,5	5,1	4,6
BC	60–105	0,2	1,3	20,8	45,9	26,1	2,2	0,8	0,5	2,2
C	105–140 и более	0,5	2,1	19,0	34,2	36,3	3,7	0,9	1,9	1,4
<i>ППП В-2 (1973)</i>										
A ₀	0–2	–	–	–	–	–	–	–	–	–
A ₁	5–15	–	–	–	36,6	40,5	2,8	7,0	7,0	6,1
AB	20–30	0,9	0,4	–	35,5	5,4	32,9	18,1	2,8	4,9
B	60–70	–	3,4	–	59,0	9,1	18,6	3,3	3,0	3,6
C	115–125	0,5	2,0	–	14,7	30,4	7,7	38,1	2,0	5,1
<i>ППП В-2 (2019)</i>										
A ₁	4–9	0,5	2,4	22,0	40,1	13,0	1,8	6,3	6,6	7,3
AB	9–25	0,7	5,3	32,1	33,2	12,3	8,9	2,5	1,6	3,4
B	25–53	0,9	2,1	16,4	18,1	7,0	6,7	36,5	5,1	7,2
BC	53–95 (100)	2,3	3,7	12,3	33,8	2,2	4,6	34,1	0,3	6,7
C	100–130	0,6	4,2	15,2	21,8	16,8	4,5	21,3	5,1	10,5

Исследования гранулометрического состава почвы на ППП 46 обнаруживают его облегчение в толще нижнего гумусово-иллювиального горизонта, однако снижение содержания фракции физической глины невелико. Анализ гранулометрического состава почвы на ППП В-2 показывает уменьшение содержания илистой фракции в переходном горизонте АВ – свидетельство подзолообразования.

Таблица 3

Некоторые химические показатели исследованных почв
Some chemical indicators of the studied soils

Горизонт	Глубина взятия образца, см	Гумус, %	Подвижные, мг/100 г		рН		Сумма поглощенных оснований ммоль (+)/100 г	Гидролитическая кислотность ммоль (+)/100 г	Степень насыщенности основаниями, %	А1	
			P ₂ O ₅	K ₂ O	солевой	водный				ммоль(+)/100 г	ммоль(+)/100 г
<i>ППП 46 (1972)</i>											
A ₀	0-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A ₁	5-15	2,11	8,8	3,9	5,4	0,2	6,5	61,0	0,80	7,20	
B ₁	20-30	0,52	8,8	4,3	5,7	8,0	3,5	69,0	0,55	4,95	
B ₂	40-60	0,22	8,8	4,2	6,1	14,2	3,0	83,0	0,57	5,13	
C	80-160	0,42	5,6	6,0	7,0	7,6	0,4	94,0	—	—	
<i>ППП 46 (2019)</i>											
A ₁	6-10	4,89	3,3	3,7	4,3	8,3	8,3	49,9	1,90	17,10	
A ₂ B	10-17	0,98	2,7	4,0	4,2	7,6	6,1	55,4	2,05	18,45	
B ₁	17-40	0,70	6,8	4,1	4,4	8,3	6,1	57,5	2,10	18,90	
B ₂	40-60	0,18	7,1	4,3	4,8	7,6	5,4	58,6	2,10	18,90	
BC	60-105	0,21	3,8	4,2	5,4	8,8	3,8	69,6	2,15	19,35	
C	105-140 и более	0,21	9,3	4,2	5,4	9,1	2,9	75,7	1,15	10,35	
<i>ППП В-2 (1973)</i>											
A ₀	0-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
A ₁	5-15	4,28	5,3	4,0	5,2	6,7	10,7	38,5	0,79	7,11	
AB	20-30	0,35	4,6	4,7	6,4	8,3	2,9	74,1	0,46	4,14	
B	60-70	0,09	2,6	4,8	6,3	13,0	2,2	85,5	0,41	3,69	
C	115-125	0,21	9,4	4,4	5,8	6,5	2,7	70,1	0,75	6,75	
<i>ППП В-2 (2019)</i>											
A ₁	4-9	2,40	2,4	3,9	4,7	8,4	6,0	58,5	1,55	13,95	
AB	9-25	1,20	2,3	4,1	4,6	8,8	4,5	66,0	2,20	19,80	
B	25-53	0,41	4,8	4,4	5,1	7,4	2,4	75,5	0,85	7,65	
BC	53-95 (100)	0,31	1,9	4,6	5,5	7,4	1,5	82,9	0,60	5,40	
C	100-130	0,31	1,5	4,3	5,2	7,8	1,7	81,7	0,80	7,20	

На ППП 46 во всех горизонтах заметно увеличилась гидролитическая кислотность. Несколько уменьшилась степень насыщенности основаниями, сумма поглощенных оснований понизилась только в иллювиальном горизонте B_2 . Содержание подвижного алюминия в почве возросло во всех горизонтах профиля в 2–3 раза.

В верхней части профиля отмечается увеличение содержания гумуса – почву данного участка можно отнести к хорошо обеспеченной гумусом. Согласно мнению Л.О. Карпачевского [11], лиственница находится на 3-м месте в ряду древесных пород по их влиянию на накопление гумуса в горизонте A_1 для лесной зоны. Почти по всему профилю почвы установлено снижение содержания подвижного фосфора (особенно в элювиальной толще), а в некоторых горизонтах – уменьшение количества подвижного калия, хотя в гумусовой толще оно возрастает. Сходное пространственное распределение фосфора обнаружено В.Д. Наумовым с соавторами [23] для почв опытной лесной дачи Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева: максимальное содержание подвижного фосфора наблюдается в почвах как под чистыми насаждениями лиственницы, так и под смешанными насаждениями с преобладанием лиственницы, а минимальное – в элювиальном горизонте [23]. Вместе с тем Е.С. Мигунова [22] не считает низкое количество в почве фосфора и калия лимитирующим фактором для произрастания хвойных насаждений. Несмотря на невысокое содержание подвижных форм основных элементов-биофилов, почвы хвойных насаждений могут обладать достаточно благоприятными лесорастительными свойствами [25].

На ППП В-2 зафиксировано увеличение кислотности солевой и, особенно, водной вытяжек из почвы по всем горизонтам профиля, что свидетельствует также о повышении интенсивности поступления органических кислот из подстилки в более зрелом насаждении. Гидролитическая кислотность растет в горизонтах АВ и В почвы и несколько уменьшается в пробе из горизонта A_1 . Количество подвижного алюминия довольно резко повышается со временем, особенно в верхних горизонтах, что коррелирует с ростом кислотности.

Сумма поглощенных оснований незначительно увеличивается в почве из горизонта A_1 и снижается в нижележащей толще профиля в 2019 г. по сравнению с разрезом 1973 г. Соответственно, сходным образом ведет себя степень насыщенности почвы основаниями. Она увеличивается в гумусовом горизонте, тогда как в нижележащих переходном и иллювиальном горизонтах отмечается ее снижение. Вероятной причиной повышения насыщенности почвы основаниями в горизонте A_1 может быть изменение состава напочвенного покрова и подстилки.

Содержание гумуса в верхнем горизонте почвы уменьшается почти в 2 раза. Однако с глубиной его значение увеличивается по сравнению с разрезом 1973 г., что, видимо, соотносится с повышением подвижности органического вещества при росте кислотности почвенного профиля. Присущий дерново-подзолистым почвам фульватный характер гумуса в подобных условиях влечет за собой снижение содержания гумуса и более «размытый» тип его профильного распределения. Практически по всей толще почвы отмечается уменьшение содержания подвижного фосфора (за исключением средней части профиля), а также подвижного калия. Это может объясняться увеличением потребления этих макроэлементов древостоем. Известно, что лиственница по сравнению с сосной создает лесную подстилку с более быстрым темпом ее разложения [12], благодаря чему усиливается кругооборот зольных элементов.

Заключение

Исследование выявило, что за 45 лет почвы под лесными культурами лиственницы европейской претерпели некоторые изменения морфологических и физико-химических свойств. При этом, сравнивая почвенные показатели в разрезах 1972, 1973 и 2019 гг., следует учитывать как горизонтальную неоднородность почвенного покрова (разрезы находятся на одних и тех же постоянных пробных площадях, но не совсем в одной точке), так и изменение со временем границ залегания генетических горизонтов.

Установлено заметное снижение содержания илистой фракции в верхней части почвенного профиля, а иногда и почти всего профиля почвы. В большинстве случаев увеличилась мощность лесной подстилки в результате ежегодного сбрасывания хвои лиственницей, а также возросли биомасса опада и темпы развития напочвенного покрова. Существенно повысились гидролитическая кислотность и содержание подвижного алюминия, что свидетельствует о выраженности кислотного гидролиза в ходе подзолообразовательного процесса и вовлечении в него в ряде случаев материала из горизонта A_1 .

В большинстве случаев в гумусово-элювиальной толще возросло количество гумуса и, как правило, увеличилась емкость поглощения почвы. На пробных площадях повысились содержание обменных оснований и степень насыщенности основаниями, особенно в верхних горизонтах почвы.

Можно сделать вывод, что в результате длительного произрастания лесных культур лиственницы европейской на фоне протекающего процесса подзолообразования не произошло существенного ухудшения химических и физико-химических свойств дерново-подзолистой почвы. И это при том, что искусственные насаждения на протяжении 4 десятилетий соответствовали Ia классу бонитета и интенсивно накапливали запас ствольной древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Анучин Н.П.* Лесная таксация. 6-е изд. М.: ВНИИЛМ, 2004. 552 с.
Anuchin N.P. *Forest Inventory*. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 552 p. (In Russ.).
2. *Березин Л.В., Карпачевский Л.О.* Лесное почвоведение. Омск: Омск. ГАУ, 2009. 360 с.
Berezin L.V., Karpachevskii L.O. *Forest Soil Science*. Omsk, OmSAU Publ., 2009. 360 p. (In Russ.).
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Methods for Studying the Physical Properties of Soils*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986. 416 p. (In Russ.).
4. *Вайчис М.В.* К вопросу о влиянии лиственницы европейской на изменение дерново-подзолистых почв // Почвоведение. 1958. № 5. С. 12–22.
Vaichis M.V. To the Problem of European Larch Influence on the Sod-Podzol Soil Changes. *Pochvovedenie = Pedology*, 1958, no. 5, pp. 12–22. (In Russ.).
5. *Воробьева Л.А.* Химический анализ почв. М.: МГУ, 1998. 272 с.
Vorob'yova L.A. *Chemical Analysis of Soils*. Moscow, MSU Publ., 1998. 272 p. (In Russ.).
6. *Добровольский В.В.* Практикум по географии почв с основами почвоведения. М.: Просвещение, 1982. 127 с.

Dobrovolskiy V.V. *Practical Course on Soil Geography with the Basics of Soil Science*. Moscow, Prosveshcheniye Publ., 1982. 127 p. (In Russ.).

7. Зайцев Б.Д. Почвы и производительность насаждений // Лесн. хоз-во. 1960. № 10. С. 16–19.

Zaitsev B.D. Soils and the Productivity of Plantations. *Lesnoe khozyaystvo*, 1960, no. 10, pp. 16–19. (In Russ.).

8. Зеликов В.Д. Почвы и бонитет насаждений. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 120 с.
Zelikov V.D. *Soils and Forest Site Quality*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1971. 120 p. (In Russ.).

9. Ирошников А.И. Лиственницы России. Биоразнообразие и селекция. Ч. 1. М.: ВНИИЛМ, 2004. 182 с.

Iroshnikov A.I. *Larches of Russia. Biodiversity and Breeding*. Part 1. Moscow, VNIILM Publ., 2004. 182 p. (In Russ.).

10. Карасев Н.Н. Повышение продуктивности лесов Подмосковья путем интродукции лиственницы: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2009. 21 с.

Karasev N.N. *Increasing the Productivity of Forests in the Moscow Region through the Introduction of Larch*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 2009. 21 p. (In Russ.).

11. Карпачевский Л.О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. М.: МГУ, 1977. 312 с.

Karpachevskiy L.O. *The Diversity of the Soil Cover in the Forest Biogeocenosis*. Moscow, MSU Publ., 1977. 312 p. (In Russ.).

12. Карпачевский Л.О. Лес и лесные почвы. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 264 с.
Karpachevskiy L.O. *Forest and Forest Soils*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 264 p. (In Russ.).

13. Карпачевский Л.О., Ашинов Ю.Н., Березин Л.В. Курс лесного почвоведения. Майкоп: Аякс, 2009. 345 с.

Karpachevskiy L.O., Ashinov Yu.N., Berezin L.V. *Forest Soil Science Course*. Майкоп, Ajax Publ., 2009. 345 p. (In Russ.).

14. Корешков Н.В., Царева Е.А. Географические культуры лиственницы. СПб.: Наукоем. технологии, 2021. 414 с.

Koreshkov N.V., Tsareva E.A. *Geographical Cultures of Larch*. St. Petersburg, Naukoemkiye tekhnologii Publ., 2021. 414 p. (In Russ.).

15. Мельник Л.П. Естественное возобновление лиственницы европейской за пределами ареала при минимальном количестве семенников // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2021. Т. 25, № 6. С. 39–44.

Melnik L.P. Natural Regeneration of European Larch outside Natural Area with Minimum of Seed Trees. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 39–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-6-39-44>

16. Мерзленко М.Д. Эталон деятельности лесовода. М.: Изд. дом Рученькиных, 2022. 174 с.

Merzlenko M.D. *The Standard of the Forester's Activity*. Moscow, Ruchen'kins' Publ. House, 2022. 174 p. (In Russ.).

17. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г. Опыт лесоводственного мониторинга в Никольской лесной даче. М.: МГУЛ, 2015. 112 с.

Merzlenko M.D., Melnik P.G. *Experience of Silvicultural Monitoring in Nicholskaya Lesnaya Dacha*. Moscow, MSFU Publ., 2015. 112 p. (In Russ.).

18. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Глазунов Ю.Б., Коженкова А.А., Перевалова Е.А. Результаты изучения географических посадок сосны и лиственницы в Серебряноборском опытном лесничестве // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 6. С. 34–43.

Merzlenko M.D., Melnik P.G., Glazunov Yu.B., Kozhenkova A.A., Perevalova E.A. Study Results of Pine and Larch Provenance Trial in Serebryanoborsky Experimental Fo-

rest District. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 6, pp. 34–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-6-34-43>

19. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Маликов А.Н. Динамика роста лиственнично-еловых лесных культур К.Ф. Тюрмера // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 2. С. 11–16.

Merzlenko M.D., Melnik P.G., Malikov A.N. Growth Dynamics of Larch-Spruce Mixed Stands Established by K.F. Turmer. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 11–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-2-11-16>

20. Мерзленко М.Д., Мельник П.Г., Мельник Л.П. Депонирование углерода стволовой фракцией в 100-летних лесных культурах хвойных пород // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 2. С. 5–10.

Merzlenko M.D., Melnik P.G., Melnik L.P. Carbon Deposit by Stem Fraction in 100-Year-Old Coniferous Species. *Lesnoy vestnik* = Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 5–10. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-2-5-10>

21. Мигунова Е.С. Леса и лесные земли (количественная оценка взаимосвязей). М.: Экология, 1993. 364 с.

Migunova E.S. *Forests and Forest Lands (a Quantitative Assessment of Mutual Relations)*. Moscow, Ecology Publ., 1993. 364 p. (In Russ.).

22. Мигунова Е.С. Лесоводство и естественные науки (ботаника, география, почвоведение). М.: МГУЛ, 2007. 592 с.

Migunova E.S. *Forestry and Natural Sciences (Botany, Geography, Soil Science)*. Moscow, MSFU Publ., 2007. 592 p. (In Russ.).

23. Наумов В.Д., Родионов Б.С., Гемонов А.В. Сравнительная оценка почв и растительности на пробных площадях лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Изв. ТСХА. 2014. Вып. 2. С. 5–18.

Naumov V.D., Rodionov B.S., Gemonov A.V. Comparative Evaluation of Soils and Vegetation on Test Plots of Forest Experimental Station of RSAU-MAA Named after K.A. Timiryazev. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyajstvennoy akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy, 2014, iss. 2, pp. 5–18. (In Russ.).

24. Орлов Д.С. Химия почв. М.: МГУ, 1992. 399 с.

Orlov D.S. *Soil Chemistry*. Moscow, MSU Publ., 1992. 399 p. (In Russ.).

25. Полякова Г.А., Меланхолин П.Н., Лысики А.Б. Динамика состава и структуры сложных боров Подмосковья // Лесоведение. 2011. № 2. С. 42–50.

Polyakova G.A., Melankholin P.N., Lysikov A.B. Dynamics of the Composition and Structure of Complex Pine Forests in Moscow Region. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2011, no. 2, pp. 42–50. (In Russ.).

26. Ремезов Н.П., Погребняк П.С. Лесное почвоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 324 с.

Remezov N.P., Pogrebnyak P.S. *Forest Soil Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 324 p. (In Russ.).

27. Роде А.А., Смирнов В.Н. Почвоведение. М.: Высш. шк., 1972. 480 с.

Rode A.A., Smirnov V.N. *Soil Science*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1972. 480 p. (In Russ.).

28. Рубцов М.В., Глазунов Ю.Б., Николаев Д.К. Лиственница европейская в центре Русской равнины // Лесн. хоз-во. 2011. № 5. С. 26–29.

Rubtsov M.V., Glazunov Yu.B., Nikolaev D.K. European Larch in the Center of the Russian Plain. *Lesnoe khozyaystvo*, 2011, no. 5, pp. 26–29. (In Russ.).

29. Самусенко В.Ф. Изменение лесорастительных свойств подзолистых почв под влиянием еловых и лиственничных культур: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: ТСХА, 1959. 22 с.

- Samusenko V.F. *Changes in Forest Vegetation Properties of Podzolic Soils under the Influence of Spruce and Larch Crops*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, 1959. 22 p. (In Russ.).
30. Тимофеев В.П. Лесные культуры лиственницы. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 216 с.
Timofeev V.P. *Forest Crops of Larch*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1977. 216 p. (In Russ.).
31. Ткаченко М.Е. Общее лесоводство. 2-е изд. / под ред. И.С. Мелехова. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1952. 598 с.
Tkachenko M.E. *General Forestry*. 2nd ed. Ed. by I.S. Melekhov. Moscow, Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1952. 598 p. (In Russ.).
32. Турик П.В., Ребко С.В. Селекция лиственницы европейской на семенную продуктивность // Тр. БГТУ. 2015. № 1(174). С. 170–173.
Turik P.V., Rebko S.V. Selection of European Larch for Seed Productivity. *Trudy BGTU* = Proceedings of BSTU, 2015, no. 1(174), pp. 170–173. (In Russ.).
33. Штукун С.С., Волович П.И., Клыш А.С. Сохранность и продуктивность лесных культур лиственницы польской, созданных на раскорчеванной вырубке // Тр. БГТУ. 2015. № 1(174). С. 107–110.
Shtukin S.S., Volovich P.I., Klysh A.S. Safety and Efficiency of Polish Larch Forest Cultures Created on the Uprooted Glade. *Trudy BGTU* = Proceedings of BSTU, 2015, no. 1(174), pp. 107–110. (In Russ.).
34. Янушко А.Д., Забелло К.Л. Влияние культур сосны и лиственницы на плодородие дерново-подзолистых почв на мощном пылеватом суглинке // Лесоведение и лесн. хоз-во. Минск, 1969. Вып. 2. С. 36–40.
Yanushko A.D., Zabello K.L. The Influence of Pine and Larch Crops on the Fertility of Sod-Podzolic Soils on Thick Silty Loam. *Lesovedenie i lesnoe khozyaystvo*, 1969, iss. 2, pp. 36–40. (In Russ.).
35. Дебрюнюк Ю.М. Лісівничо-таксаційні аспекти культивування ялиново-модринових насаджень у Західному Лісостепу України // Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2014. Вип. 12. С. 99–108.
Debryniuk Yu. Forestry and Taxation Aspects of the Cultivation of Spruce and Larch Plantations in the Western Steppe of Ukraine. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 2014, iss. 12, pp. 99–108. (In Ukr.).
36. Дебрюнюк Ю.М., Белеля С.О. Формова різноманітність і життєвий стан модрини у насадженнях Західного Полісся // Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2016. Вип. 14. С. 117–125.
Debryniuk Yu., Beleya S. Variety of Forms and Vitality of the Larch in the Stands of Western Polissia. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 2016, iss. 14, pp. 117–125. (In Ukr.).
37. Заїка В.К., Керімов Е.І., Іваницький Р.С. Поширення та ріст модрини європейської в умовах Кременецького горбогір'я // Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2016. Вип. 14. С. 45–51.
Zaika V., Kerimov E., Ivanytskii R. European Larch Expansion and Growth in Conditions of Kremenetsk Hilly Region. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 2016, iss. 14, pp. 45–51. (In Ukr.).
38. Chylarecki H. *Modrzewie w Polsce*. Warszawa, 2000. 148 p. (In Pol.).
39. Esper J., Riechelmann D.F.C., Holzkämper S. Circumferential and Longitudinal $\delta^{13}\text{C}$ Variability in a *Larix decidua* Trunk from the Swiss Alps. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 1, art. no. 117. <https://doi.org/10.3390/f11010117>
40. Fellner H., Dirnberger G.F., Sterba H. Specific Leaf Area of European Larch (*Larix decidua* Mill.). *Trees*, 2016, vol. 30, pp. 1237–1244. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1361-1>

41. Kain G., Lienbacher B., Barbu M.-C., Richter K., Petutschnigg A. Larch (*Larix decidua*) Bark Insulation Board: Interactions of Particle Orientation, Physical–Mechanical and Thermal Properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, pp. 489–498. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1271-y>
42. Lewandowski A., Burczyk J. Mating System and Genetic Diversity in Natural Populations of European Larch (*Larix decidua*) and Stone Pine (*Pinus cembra*) Located at Higher Elevations. *Silvae Genetica*, 2000, vol. 49, no. 3, pp. 158–161.
43. Matras J. Badania proveniencyjne modrzewia prowadzone przez Instytut Badawczy Leśnictwa w latach 1948–2000. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa. Seria A*, 2001, no. 908–912, pp. 41–63. (In Pol.).
44. Melnik L.P. Dissemination and Natural Regeneration Dynamics of Larch in Nikolskaya Forest Estate. *56th Student's Scientific International Conference*. Slovak Republic, Technical University in Zvolen, 2015, pp. 1213–1223.
45. Melnik L.P. Dissemination of Larch and its Natural Regeneration Composition Dynamics under the Conditions of Simple Fresh Subor of the Nikolskaya Lesnaya Dacha. *Eurasian Forests – Serbian Forests: Materials of the XVIII International Conference of Young Scientists, Dedicated to the Academician Prof. Žarko Miletić (1891–1968)*. Belgrade, University of Belgrade Faculty of Forestry, 2019, pp. 135–139.
46. Melnik P.G., Karasyov N.N. Productivity of Different Larch Types in Moscow Region. *Eurasian Forests – Hungarian Forests: Materials of the VI International Conference of Young Scientists*. Moscow, MSUF, 2006, pp. 83–85.
47. Nebe W., Hofmann W. Der Gesamt Ca-Gehalt des Bodens als wesentliche Fruchtbarkeitskennziffer forstlicher Standorte. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, 1982, vol. 22, iss. 1, pp. 19–25. (In Germ.). <https://doi.org/10.1515/9783112532522-004>
48. Novak K., de Luis M., Škrk N., Straže A., Čufar K. Tree-Ring Chronologies of *Picea abies*, *Larix decidua* and *Fagus sylvatica* along Altitudinal Gradients. *Les/Wood*, 2022, vol. 71, no. 1, pp. 31–46. <https://doi.org/10.26614/les-wood.2022.v71n01a04>
49. Szeligowski H. The Assessment of Polish Provenances of European Larch at an Experimental Plot in Rogyw (Central Poland). *Folia Forestalia Polonica, Seria A – Forestry*, 2001, no. 43, pp. 53–68.

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

Научная статья

УДК 630*242:630*243

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-105-117

Формирование морфологии деревьев культивируемых сосновых древостоев

А.Е. Осипенко, канд. с.-х. наук; ResearcherID: [AAG-1421-2021](https://orcid.org/0000-0002-6148-1747),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6148-1747>

С.В. Залесов[✉], д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; osipenkoae@m.usfeu.ru, zalesovsv@m.usfeu.ru[✉]

Поступила в редакцию 02.08.22 / Одобрена после рецензирования 03.11.22 / Принята к печати 05.11.22

Аннотация. Цель исследования – оценка качественных характеристик крон, стволов и роста деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в искусственных древостоях сухого бора пологих всхолмлений, пройденных прореживаниями регулярно-равномерным способом, а также разработка на основании полученных данных предложений производству. Изучаемые древостои произрастают в юго-западной части ленточных боров Алтайского края на территории Ключевского лесничества. Рубки прореживания были проведены в 2016 г. в рамках плановых мероприятий по уходу за лесами. Полевой этап исследования выполнен в 2022 г. Заложенные пробные площади имели прямоугольную форму и размер не менее 0,25 га. Оценка качественных признаков деревьев производилась в соответствии с классификацией, предложенной Г.А. Чибисовым с соавторами. Достоверность различий (или их отсутствие) в распределении деревьев по категориям качества на участках устанавливалась при помощи критерия χ^2 для сопоставления 2 распределений. Приведены таксационная характеристика основного элемента леса исследуемых древостоев; индексы качества для оцениваемых показателей деревьев; графики распределения деревьев по ступеням толщины и категориям качества. Установлено, что большая доля деревьев имеет плохие кроны (27–45 %) и рост (14–41 %). Такие показатели являются следствием чрезмерно высокой густоты древостоев и отсутствия своевременных рубок ухода. Прореживания регулярно-равномерным способом умеренной и умеренно-высокой интенсивности способствовали повышению категории качества деревьев. Воздействие рубок высокой и очень высокой интенсивности на древостои было негативным. На основании проведенного исследования рекомендовано осуществлять прореживание в более раннем возрасте древостоя; отказаться от регулярно-равномерного способа рубки в пользу селективных рубок по низовому методу (при наличии такой возможности); в изучаемых древостоях и подобных им осуществлять рубки прореживания по наибольшему отпускному диаметру 10 см. Продолжить исследование можно в следующих направлениях: установление оптимального отпускного диаметра в более молодых культурах и в условиях других типов леса; определение интервалов оптимальной густоты сосновых древостоев различного возраста и различных типов леса. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании хозяйственных мероприятий в районе исследования.

Ключевые слова: лесные культуры, древостои, прореживание, сосна обыкновенная, классификация деревьев, сухой бор пологих всхолмлений, Алтайский край

Благодарности: Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-293.2022.5.

Для цитирования: Осипенко А.Е., Залесов С.В. Формирование морфологии деревьев культивируемых сосновых древостоев // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 105–117. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-105-117>

Original article

Formation of Tree Morphology in Cultivated Pine Stands

Aleksey E. Osipenko, Candidate of Agriculture; ResearcherID: [AAG-1421-2021](https://orcid.org/0000-0002-6148-1747),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6148-1747>

Sergey V. Zalesov[✉], Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [H-2605-2019](https://orcid.org/0000-0003-3779-410X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3779-410X>

Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; osipenkoae@m.usfeu.ru, zalesovsv@m.usfeu.ru[✉]

Received on August 2, 2022 / Approved after reviewing on November 3, 2022 / Accepted on November 5, 2022

Abstract. The aim of this study is to assess the qualitative characteristics of the crowns, stems and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees in cultivated stands of a dry forest on gently sloping hills thinned in a regular-uniform manner, as well as to develop proposals for production based on the data obtained. The stands under study grow in the southwestern part of the ribbon forests of the Altai Territory in the territory of the Klyuchevskoye forestry. The thinning was carried out in 2016 as part of the planned forest maintenance activities. The field stage of the research was completed in 2022. The sample plots laid had a rectangular shape and a square of at least 0.25 ha. The assessment of the qualitative characteristics of the trees has been carried out in accordance with the classification proposed by G.A. Chibisov et al. The significance of differences (or their absence) in the tree distribution by quality categories in the plots has been established using the χ^2 test for comparing two distributions. The article presents the taxation characteristics of the main forest element of the stands under study, the quality indices for the assessed tree indicators, and the graphs of tree distribution by diameter and quality classes. It has been found that most of the trees have poor crowns (27–45 %) and growth (14–41 %). Such indicators are a consequence of an excessively high density of the stands and the lack of timely thinning. Regular-uniform thinning of moderate and moderately high intensity has contributed to an increase in the quality class of the trees. The impact of high and very high intensity thinning on the stands has been negative. Based on the conducted research, it is recommended to carry out thinning at an earlier age of the stand, abandon the regular-uniform thinning in favor of selective thinning using the grassroots method (if possible) and carry out thinning along the largest exploitable diameter of 10 cm in the studied forest stands and similar ones. The study can be continued by establishing the optimal exploitable diameter in younger plantations and in other types of forests, as well as determining the intervals of optimal density of pine stands of different ages and different types of forest. The results obtained can be useful in designing economic activities in the study area.

Keywords: forest plantations, stand, thinning, Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), classification of trees, dry forest on gently sloping hills, the Altai Territory



Acknowledgements: This study was carried out as part of the grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of science no. MK-293.2022.5.

For citation: Osipenko A.E., Zalesov S.V. Formation of Tree Morphology in Cultivated Pine Stands. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 105–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2105-117>

Введение

В ленточных борах Алтайского края последние 2 десятилетия при прореживании лесных культур, в т. ч. и ленточных (полосных), активно применяется регулярно-равномерный способ рубки. Хотя в «Технических указаниях по проведению рубок ухода в культурах светловойных пород в ленточных борах» данный способ рекомендуется к применению только в сплошных культурах [6]. В искусственных сосняках полосного типа под технологические коридоры лучше использовать межполосные пространства или ряды с кустарниками. Во втором случае при необходимости кустарник следует измельчать фрезами ФЛУ-0,8 или МЛФ-0,9. Однако на практике соблюдение данных рекомендаций не всегда возможно. Причины могут быть следующие: большое количество рядов в полосных культурах (12 и более) не позволяет производить валку из центральных рядов без зависания деревьев (даже в 5-рядных культурах валка из центрального ряда затруднена из-за высокой густоты культур в пределах ленты); межленточные пространства или ряды, в которые высаживались кустарники, зачастую зарастают крупным жизнеспособным подростом, уничтожать который с лесоводственной точки зрения нецелесообразно; финансирование рубок ухода и материальная база (отсутствие фрез и мощной техники) при выполнении работ по уходу за лесами являются недостаточными. Таким образом, из-за указанных сложностей в районе исследования накоплен значительный опыт применения регулярно-равномерных рубок ухода в ленточных культурах сосны, который до настоящего времени мало изучен. В работе предпринята попытка оценить результаты данной практики.

Для правильной лесоводственной оценки рубки прореживания, основная цель которой – уход за формой ствола и кроны лучших деревьев, необходимо различать деревья в соответствии с их качественными характеристиками. В соответствии с приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 30 июля 2020 г. № 534 «Об утверждении Правил ухода за лесами», в России при осуществлении ухода за лесными насаждениями применяется классификация деревьев, согласно которой все они по их лесоводственно-биологическим признакам распределяются на 3 категории: лучшие, вспомогательные и нежелательные. Однако критерии отнесения деревьев к указанным категориям качества, по нашему мнению, расплывчатые и требуют конкретизации. Уточнение данной классификации может существенно повысить лесоводственную эффективность рубок ухода. В этом направлении работали и другие ученые [4, 8].

Для наших исследований использована классификация, предложенная Г.А. Чибисовым с соавторами [13]. Несмотря на то, что данная классификация разрабатывалась для отбора деревьев будущего при рубках ухода за лесом на

Европейском Севере, она вполне успешно зарекомендовала себя при классификации деревьев в лесных культурах свежего бора [10].

Цель исследования – оценка качественных характеристик деревьев сосны обыкновенной в ленточных культурах, произрастающих в условиях сухого бора пологих всхолмлений, пройденных регулярно-равномерными прореживаниями, а также разработка на основании полученных данных предложений производству.

Объекты и методы исследования

Полевой этап исследования осуществлялся в мае 2022 г. на территории Бастанского участкового лесничества Ключевского лесничества Алтайского края (Михайловский административный район).

Объектом исследования являлись средневозрастные искусственные сосновые древостои, произрастающие в условиях сухого бора пологих всхолмлений (тип лесорастительных условий – А₁). На момент проведения работ древостои характеризовались IV классом бонитета. Исследуемые ленточные лесные культуры были созданы ручной посадкой 2-летних семян сосны в дно плужных борозд. Ленты состоят из 6–12 сближенных рядов и разделены межленточными пространствами шириной 6–17,5 м. Густота посадки – 3,7–5,6 тыс. шт./га. В 2016 г. в 5 исследуемых сосняках – на пробных площадях (ПП) К1, К2, К5, К6, К10 (табл. 1) – были выполнены рубки прореживания различной интенсивности. Они осуществлялись арендующей лесной организацией в качестве планового мероприятия. Способ проведения работ – регулярно-равномерный (линейно-селективный): полностью вырубался каждый 3–5-й ряд и выборочно удалялись отдельные деревья в оставшихся рядах. Рубки ухода выполнялись по стандартной для района исследования безопасной технологии: клеймение деревьев; валка деревьев бензопилами; очистка стволов от сучьев и раскряжевка на месте валки; трелевка сортиментов колесным трактором МТЗ-82 с навесным оборудованием «Муравей». Движение трактора осуществлялось по вырубленным рядам и межленточным пространствам лесных культур.

ПП К3 и К4 были выбраны в качестве контрольных, на них рубки не проводились. ПП К3 представляет собой древостой, развивавшийся при сравнительно невысокой густоте, а ПП К4 – напротив, наиболее густой из изучаемых древостоев.

Основным методом исследования являлся метод ПП [2]. Они имели прямоугольную форму, размер – не менее 0,25 га. Их границы в длину проходили по центру межленточных пространств. Производился сплошной пересчет деревьев с замером их диаметров на высоте 1,3 м.

Качественные признаки деревьев оценены в соответствии с классификацией Г.А. Чибисова с соавторами [4, 13]. Согласно данной классификации, деревья, оставляемые для дорастивания, отбираются с учетом показателей качества кроны, ствола и характера роста. В основе характеристики деревьев лежат следующие показатели: отношение диаметра дерева на высоте 1,3 м к высоте ствола, отношение длины кроны к высоте ствола, отношение диаметра кроны к ее длине. Качество кроны оценивалось по 3-балльной шкале с присвоением индексов 100, 200, 300; качество ствола – также по 3-балльной шкале с присвоением индексов 10, 20, 30; характеристика роста (положение в пологе) – по 4-бал-

льной шкале с присвоением индексов 1, 2, 3, 4 [4]. После проведения оценки по каждому признаку, результаты складывались в 3-значный комплексный индекс. Затем производилась сортировка деревьев на 3 категории качества: «хорошие» – деревья с комплексными индексами 111, 112, 121, 211; «средние» – деревья с индексами 122, 212, 221, 222; «плохие» – деревья с другими комбинациями индексов.

Таблица 1

**Таксационная характеристика элементов леса
искусственных сосновых древостоев
Taxation characteristics of forest elements of the cultivated pine stands**

ПП	Интенсивность рубки по запасу/густоте, %	Элемент леса	Средние			Текущая густота, шт./га	Сумма площадей сечений, м ² /га	Относительная полнота	Запас, м ³ /га
			возраст, лет	высота, м	диаметр, см				
К3	–	10С	66	14,3	15,8	1165	23,2	0,76	172
К4	–	9С	66	12,4	12,2	2411	28,1	0,97	183
		1С	60	12,4	12,8	192	2,5	0,09	17
К5	27,3 39,3	10С	66	13,7	15,9	1034	20,5	0,67	142
		+С	50	10,6	10,0	19	0,1	0,01	1
К6	38,0 47,9	10С	66	13,6	13,2	1392	19,2	0,63	133
К1	46,2 52,3	9С	66	11,3	12,0	1004	11,3	0,40	69
		1С	60	12,4	14,6	52	0,9	0,03	6
К2	48,1 49,8	10С	66	13,3	15,4	806	14,9	0,50	106
К10	56,4 52,4	9С	68	12,9	12,9	838	10,9	0,36	78
		1С	80	19,2	24,2	24	1,1	0,04	11

На каждой ПП высотомером Suunto РМ-5/1520 РС замерялись высоты 20–25 деревьев, относящихся к разным ступеням толщины (пропорционально их представленности). В камеральных условиях по графику высот определялась средняя высота каждого элемента леса.

Для установления достоверности различий распределения деревьев по классам качества в исследуемых древостоях применялся критерий χ^2 для сопоставления 2 распределений [14].

Более подробно объект и методы исследований описаны в нашей работе [9].

Результаты исследования и их обсуждение

В исследуемых искусственных древостоях зафиксирована довольно низкая доля деревьев с хорошо развитой симметричной кроной – от 3 до 19 %, что объясняется высокой густотой стояния деревьев и их неравномерным размещением по площади. Первое обусловлено ленточным способом посадки культур, второе – запоздалым проведением рубки прореживания (в 58–60-летнем возрасте). При этом доля прямоствольных деревьев довольно высока – от 67 до 80 %, что, вероятно, также является следствием названных причин. Доля господствующих и согосподствующих деревьев (деревья I и II классов Крафта, или с индексом «100»

по используемой классификации) в исследуемых древостоях – 31–55 %. Наиболее частыми причинами отнесения деревьев к категории «плохие» являлось неудовлетворительное состояние кроны и расположение в подчиненной части полога. Доля деревьев с плохими кронами в исследуемых древостоях варьирует от 27 до 45 %, с плохим ростом – от 14 до 41 %. Распределение оцениваемых показателей деревьев по индексам качества и средневзвешенное значение по каждому показателю приведены в табл. 2.

Распределение деревьев по категориям качества и ступеням толщины показано на рисунке. Размах вариации деревьев по диаметру в исследуемых древостоях составляет от 22 до 32 см. Наиболее толстые деревья зафиксированы на ПП К2 и К3. Насаждения данных ПП имели на момент рубки (2016 г.) наименьшую густоту – 1,6 и 1,2 тыс. шт./га соответственно [9].

Наибольшее количество хороших деревьев зафиксировано на ПП К4 (818 шт./га), К5 (477 шт./га) и К6 (619 шт./га), наименьшее – на ПП К1 (313 шт./га) и К10 (223 шт./га). На ПП К2, К3, К5, К6 по доле участия преобладают деревья из категории «хорошие» (39,6; 40,4; 46,2; 44,5 % соответственно), что объясняется правильным отбором деревьев в рубку на ПП К2, К5 и К6 и относительно невысокой густотой древостоя ПП К3. На ПП К1, К4, К10 преобладают деревья из категории «плохие». Для ПП К4 (48,9 % плохих деревьев) это связано с чрезмерно высокой густотой древостоя, обусловленной отсутствием рубок ухода; для ПП К1 и К10 (50,2 и 46,2 % плохих деревьев соответственно) – с нарушением лесоводственного принципа отбора деревьев для рубок и их чрезмерно высокой интенсивностью.

На основании приведенных данных можно заключить, что на ПП К5 и К6, где проводилось прореживание умеренной и умеренно-высокой интенсивности, рубки оказали положительный эффект на древостои. На ПП К1 и К10, где рубки характеризовались высокой и очень высокой интенсивностью, воздействие проводимых мероприятий на древостои было негативным. На ПП К2, несмотря на то, что рубка имела высокую интенсивность, прореживание оказало неоднозначный эффект: относительная полнота снизилась слишком сильно, но при этом отбор деревьев в рубку производился корректно.

Если сравнивать контрольные участки, то более выигрышно смотрится древостой на ПП К3, характеризующийся более низкой густотой по сравнению с древостоем ПП К4. При более чем в 2 раза меньшей густоте первый имеет меньший (на 6,0 %) запас и превосходящую долю (на 6,5 %) хороших деревьев, при этом средний объем одного дерева в 2 раза выше, чем на ПП К4. Кроме того, количество деревьев на ПП К3 больше их количества, требуемого для формирования к возрасту спелости древостоя с оптимальной густотой [1, 5]. Данный факт свидетельствует о необходимости раньше проводить рубки ухода и согласуется с научными данными [15, 16, 22, 23].

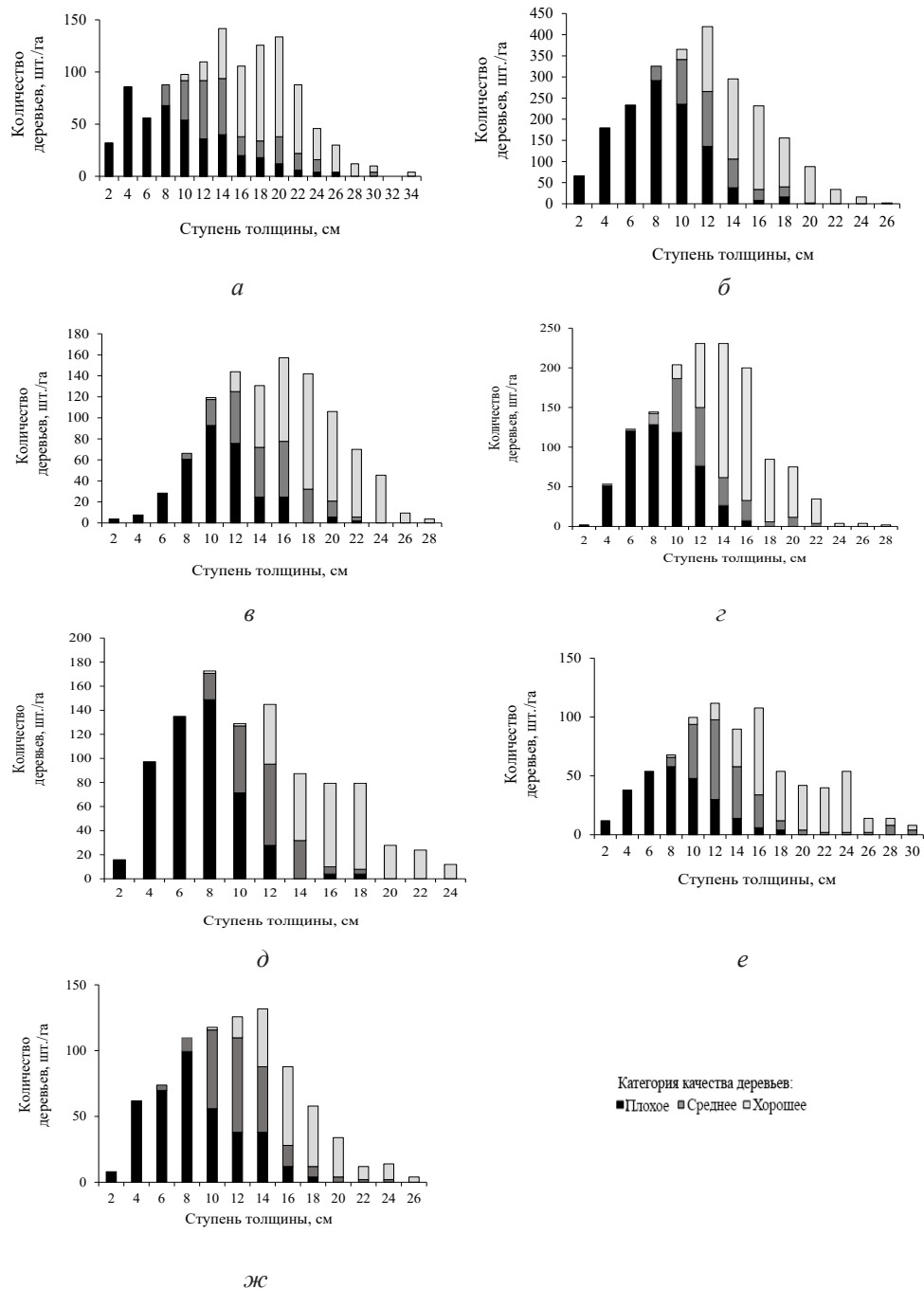
По сведениям ряда авторов [7, 11], спелые древостои формируются из 800 лучших деревьев, произрастающих на 1 га. В исследуемых древостоях количество лучших деревьев после регулярно-равномерной рубки значительно снижено, а оставленные на доращивание деревья далеко не все являются лучшими. Последнее наталкивает на мысль о нецелесообразности прореживания регулярно-равномерным способом, особенно – высокой и очень высокой интенсивности.

Таблица 2

**Распределение оцениваемых показателей деревьев
искусственных сосновых древостоев по индексам качества**
**Distribution of the assessed indicators of trees in the cultivated pine stands
by quality indices**

ПП	Показатель	Индексы качества				Всего
		100, 10, 1	200, 20, 2	300, 30, 3, 4	Средневзвешенное значение	
К3	Крона	$\frac{152}{13}$	$\frac{690}{59}$	$\frac{323}{28}$	2,1	$\frac{1165}{100}$
	Ствол	$\frac{798}{68}$	$\frac{287}{25}$	$\frac{80}{7}$	1,4	
	Рост	$\frac{610}{52}$	$\frac{251}{22}$	$\frac{303}{26}$	1,7	
К4	Крона	$\frac{176}{7}$	$\frac{1142}{48}$	$\frac{1094}{45}$	2,4	$\frac{2411}{100}$
	Ствол	$\frac{1784}{74}$	$\frac{579}{24}$	$\frac{48}{2}$	1,3	
	Рост	$\frac{998}{41}$	$\frac{579}{24}$	$\frac{834}{35}$	1,9	
К5	Крона	$\frac{159}{15}$	$\frac{564}{55}$	$\frac{310}{30}$	2,1	$\frac{1034}{100}$
	Ствол	$\frac{689}{67}$	$\frac{307}{30}$	$\frac{38}{3}$	1,4	
	Рост	$\frac{564}{55}$	$\frac{326}{31}$	$\frac{144}{14}$	1,6	
К6	Крона	$\frac{142}{10}$	$\frac{738}{53}$	$\frac{512}{37}$	2,3	$\frac{1392}{100}$
	Ствол	$\frac{1115}{80}$	$\frac{265}{19}$	$\frac{12}{1}$	1,2	
	Рост	$\frac{719}{52}$	$\frac{431}{31}$	$\frac{242}{17}$	1,7	
К1	Крона	$\frac{190}{19}$	$\frac{437}{43}$	$\frac{377}{38}$	2,2	$\frac{1004}{100}$
	Ствол	$\frac{726}{72}$	$\frac{242}{24}$	$\frac{36}{4}$	1,3	
	Рост	$\frac{329}{33}$	$\frac{258}{26}$	$\frac{417}{41}$	2,1	
К2	Крона	$\frac{152}{19}$	$\frac{435}{54}$	$\frac{219}{27}$	2,1	$\frac{806}{100}$
	Ствол	$\frac{582}{72}$	$\frac{207}{26}$	$\frac{16}{2}$	1,3	
	Рост	$\frac{351}{44}$	$\frac{267}{33}$	$\frac{187}{23}$	1,8	
К10	Крона	$\frac{28}{3}$	$\frac{531}{64}$	$\frac{279}{33}$	2,3	$\frac{838}{100}$
	Ствол	$\frac{654}{78}$	$\frac{148}{18}$	$\frac{36}{4}$	1,3	
	Рост	$\frac{259}{31}$	$\frac{303}{36}$	$\frac{275}{33}$	2,0	

Примечание: В числителе – количество деревьев, принадлежащих к определенному индексу; в последнем столбце – густота древостоя (шт./га); в знаменателе – доля деревьев от всего их количества (%).



Распределение деревьев по ступеням толщины и категориям качества в искусственных сосняках ПП: а – К3; б – К4; в – К5; г – К6; д – К1; е – К2; ж – К10

Distribution of the trees by diameter and quality classes in the cultivated pine stands on the SPs: а – К3; б – К4; в – К5; г – К6; д – К1; е – К2; ж – К10

Данные рисунка свидетельствуют, что наибольшая доля плохих деревьев – в среднем 74 ± 6 % (от 48 до 90 %) – имеет ступени толщины 2–10 см. В связи с этим считаем возможным рекомендовать проведение в искусственных

сосновых древостоях 50–60-летнего возраста, произрастающих в условиях сухого бора пологих всхолмлений, прореживание по наибольшему отпускному диаметру 10 см (вырубаются деревья данного диаметра и тоньше). Для подтверждения данного предложения в табл. 3 приведена таксационная характеристика частей исследуемых древостоев, состоящих из деревьев с диаметрами до 10 см и более.

Данные табл. 3 показывают, что в случае рубки по наибольшему отпускному диаметру удаляться будут деревья со средним диаметром $7,6 \pm 0,4$ см и высотой $8,8 \pm 1,0$ м. При этом относительная полнота снизится не более чем на 0,1–0,2. Интенсивность рубок по запасу не превысит нормативных значений (15–30 %), при этом рубки ухода в районе исследования перейдут на качественно иной уровень: интенсивность можно будет контролировать не снижением полноты древостоя, а прежде всего количеством и запасом вырубаемых деревьев [12]. Кроме того, низовой метод отбора деревьев в рубку как более подходящий для чистых сосновых древостоев [3], вероятно, увеличит лесоводственную эффективность рубок ухода в районе исследования. В противовес данному утверждению существуют рекомендации и научные исследования, предписывающие проведение рубок ухода по комбинированному методу [6, 17, 21], а также исследования, ставящие под сомнение целесообразность рубок ухода в сосняках в связи с тем, что сосновые древостои без рубок ухода способны давать такой же объем товарной древесины, как и сосняки, пройденные рубками ухода, причем независимо от метода отбора деревьев в рубку и сроков начала прореживаний [20]. Однако вопрос о том, компенсируются ли затраты на прореживание доходом от более ранних прореживаний и большей долей крупномерной древесины, многие авторы оставляют предметом дальнейшего изучения [18, 19].

Следует отметить, что при предлагаемом способе рубки будет отсутствовать возможность передвижения трактора по вырубленным рядам культур, однако наличие межленточных пространств в исследуемых лесных культурах в значительной степени нивелирует данное неудобство.

Применение критерия χ^2 позволило выявить достоверные различия или их отсутствие в распределении деревьев по категориям качества на опытных участках по сравнению с ПП К3 и К4 (табл. 4). При уровне статистической значимости $p \leq 0,05$ и числе степеней свободы, равном 2, критическое значение χ^2 составляет 5,99. Следовательно, эмпирические значения χ^2 , превышающие это значение, свидетельствуют о достоверности различий в распределении деревьев по классам качества между 2 сравниваемыми выборками.

Данные табл. 4 для всех деревьев, оставленных на дорастивание, показывают отсутствие достоверных отличий соотношения хороших, средних и плохих деревьев на ПП К3 от соотношений для ПП К2, К5 и К6, что, вероятно, является подтверждением правильного отбора деревьев в рубку. Достоверные различия выявлены для ПП: К3 и К1, К4 и К10. Это объясняется тем, что на ПП К4 древостой очень загущен, а на ПП К1 и К10 был нарушен лесоводственный принцип отбора деревьев в рубку [9].

Таблица 3

Таксационная характеристика частей искусственных сосняков, состоящих из деревьев диаметром до 10 см (включительно) и более 10 см
Taxation characteristics of parts of the cultivated pine stands consisting of the trees with a diameter of up to 10 cm (inclusive) and more than 10 cm

ПП	Количество деревьев, шт./га		Средние		Сумма площадей сечений, м ² /га	Относительная полнота	Запас, м ³ /га	Доля, %, от текущих	
	всего	в т. ч. плохие	диаметр, см	высота, м				запаса	густоты
<i>Диаметр – 10 см и менее</i>									
К3	343	287	7,1	7,4	1,3	0,04	6	3,6	29,4
К4	1090	974	7,4	7,9	4,7	0,16	23	12,5	45,2
К5	174	155	8,3	9,4	1,0	0,03	5	3,5	16,8
К6	465	392	7,8	10,8	2,2	0,07	13	9,8	32,8
К1	524	456	7,3	9,0	2,2	0,08	11	15,9	52,2
К2	239	196	7,5	8,9	1,1	0,04	5	4,7	30,0
К10	343	287	7,5	8,5	1,5	0,05	7	9,6	40,9
<i>Диаметр – более 10 см</i>									
К3	822	148	18,4	15,6	21,9	0,72	166	96,4	70,6
К4	1321	228	15,0	14,0	23,4	0,81	160	87,5	54,8
К5	860	170	17,0	14,2	19,5	0,64	137	96,5	83,2
К6	927	142	15,3	14,3	17,0	0,56	120	90,2	67,2
К1	480	48	15,5	12,7	9,1	0,32	58	84,1	47,8
К2	567	68	17,6	14,5	13,8	0,46	101	95,3	70,0
К10	495	100	15,5	14,8	9,4	0,31	71	90,4	59,1

Таблица 4

Эмпирические значения критерия χ^2 при сравнении опытных ПП с контрольными
Empirical values of the χ^2 test when comparing the experimental SPs with the control ones

Контрольная ПП	ПП						
	К3	К4	К5	К6	К1	К2	К10
<i>Все деревья, оставленные на доращивание</i>							
К3	–	6,86	1,73	1,62	7,13	1,94	7,85
К4	6,62	–	13,45	5,94	0,56	15,00	9,17
<i>Деревья с диаметром более 10 см</i>							
К3	–	0,82	0,21	3,58	4,57	4,63	6,34
К4	0,87	–	1,24	1,06	3,94	8,31	12,48

Древостой на ПП К4 имеет достоверные различия в распределении деревьев по качеству с древостоями на ПП К2, К3, К5, К10, что подтверждает достоверно большее количество плохих деревьев в загущенном древостое. Хотя в случае ПП К10 это не совсем так: для данного участка достоверные различия накоплены за счет уменьшения доли лучших деревьев, а не худших. Эмпирическое значение χ^2 ПП К6 вплотную приблизилось к критическому, но не превысило его. Однако следует отметить, что на ПП К6 соотношение плохих и

хороших деревьев довольно сильно смещено в пользу хороших. Единственный участок, на котором соотношение хороших, средних и плохих деревьев практически идентично распределению на ПП К4, – это ПП К1, что также может объясняться нарушением лесоводственного принципа отбора деревьев в рубку.

Альтернативный вариант интерпретации данных об отсутствии различий в распределениях деревьев на ПП К4 с ПП К6 и К1 может заключаться в следующем: густота на этих участках до рубки была наибольшей среди исследуемых древостоев (2,4, 2,7 и 2,2 тыс. шт./га соответственно); вероятно, из-за высокой густоты древостоев в полностью вырубленных рядах была удалена значительно бóльшая доля деревьев, чем в других, редких по сравнению с указанным, древостоях. По этой причине селективный отбор деревьев в оставшихся рядах существенно не повлиял на соотношение деревьев различного качества.

Интересная закономерность наблюдается в соотношении деревьев различного качества с диаметрами более 10 см: с увеличением интенсивности рубки различия между контрольными и опытными участками (как и эмпирические значения χ^2) возрастают. Коэффициенты корреляции между показателями составляют 0,98 для К3 и 0,88 для К4. Также примечательно, что при достоверных различиях в распределении по качеству всех оставленных на доразращивание деревьев на контрольных участках отличий в распределении деревьев с диаметром более 10 см не наблюдается.

Выводы

1. Рубки прореживания регулярно-равномерным способом умеренной и умеренно-высокой интенсивности могут оказывать положительное влияние на распределение деревьев по категориям качества в искусственных сосновых древостоях. Однако при проведении рубок высокой и очень высокой интенсивности данный способ рубки негативно влияет на такие древостои.

2. Режим выращивания большей части исследуемых древостоев нельзя назвать оптимальным. Рубки прореживания необходимо проводить в более раннем возрасте – в начале или середине 2-го класса возраста.

3. В случаях, когда ленты культур состоят менее чем из 7 рядов и если межленточные пространства в таких культурах не заняты крупным подростом (или деревьями естественного происхождения), рекомендуется отказываться от регулярно-равномерного способа рубки в пользу селективных рубок по низовому методу.

4. В 50- и 60-летних культурах сосны, произрастающих в условиях сухого бора пологих всхолмлений, рекомендуется осуществлять селективные рубки прореживания по наибольшему отпускному диаметру 10 см. Применение данного принципа позволит удалить из древостоев бóльшую часть отставших в росте угнетенных деревьев, минимизировать естественный отпад и снизить трудозатраты при отборе деревьев в рубку.

5. Для установления оптимального отпускного диаметра в более молодых культурах и в условиях других типов леса необходимо провести подобные изыскания. Также для района исследования необходимо установить интервалы оптимальной густоты сосновых древостоев различного возраста, дифференцированные по типам леса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Борисов А.Н., Иванов В.В., Петренко А.Е. Формирование пространственной структуры сосновых древостоев при рубках ухода // Лесоведение. 2019. № 1. С. 7–18.

Borisov A.N., Ivanov V.V., Petrenko A.E. Formation of Spatial Structure of Pine Stands Formed by Improvement Cuttings. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2019, no. 1, pp. 7–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0024114819010042>

2. Бунькова Н.П., Залесов С.В., Залесова Е.С., Магасумова А.Г., Осипенко Р.А. Основы фитомониторинга. 3-е изд., доп. и перераб. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 90 с.

Bun'kova N.P., Zalesov S.V., Zalesova E.S., Magasumova A.G., Osipenko R.A. *Fundamentals of Phytomonitoring*. 3rd ed., revised and enlarged. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 90 p. (In Russ.).

3. Залесов С.В. Лесоводство. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 295 с.

Zalesov S.V. *Forestry*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 295 p. (In Russ.).

4. Захаров А.Ю., Чибисов Г.А. Классификация деревьев при рубках ухода // Лесн. вестн. / Forestry bulletin. 2013. № 3(95). С. 76–80.

Zakharov A.Yu., Chibisov G.A. Classification of Trees During Thinning. *Lesnoy vestnik* = Forestry bulletin, 2013, no. 3(95), pp. 76–80. (In Russ.).

5. Иванов В.В., Борисов А.Н., Петренко А.Е., Семенякин Д.А., Собачкин Д.С., Собачкин Р.С. Густота сосновых древостоев при интенсивном лесовыращивании // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 102–109.

Ivanov V.V., Borisov A.N., Petrenko A.E., Semenyakin D.A., Sobachkin D.S., Sobachkin R.S. The Density of Pine Stands under Intensive Forest Growing. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2017, no. 6, pp. 102–109. (In Russ.).

6. Маленко А.А., Парамонов Е.Г., Ключников М.В., Ртищев С.Я. Технические указания по проведению рубок ухода в культурах светлохвойных пород в ленточных борах. Барнаул: АГАУ, 2009. 22 с.

Malenko A.A., Paramonov E.G., Klyuchnikov M.V., Rtishchev S.Ya. *Technical Guidance for Carrying out Improvement Felling in Light Coniferous Crops in Ribbon Forests*. Barnaul, ASAU Publ., 2009. 22 p. (In Russ.).

7. Минин Н.С. Динамика роста лучших деревьев в сосняках искусственного происхождения под влиянием рубок ухода // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 4. С. 26–30.

Minin N.S. Growth Dynamics of Best Trees in Pine Stands of Artificial Origin under Thinning Influence. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2003, no. 4, pp. 26–30. (In Russ.).

8. Николаева И.О., Соловьев В.М. Классификация особей в хвойных насаждениях естественного происхождения для оценки их изменчивости // Успехи соврем. естествознания. 2019. № 12. С. 14–19.

Nikolaeva I.O., Solov'ev V.M. Classifying Specimen within Coniferous Plantations of Natural Origin in Order to Assess their Variability. *Uspekhi sovremennoy estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2019, no. 12, pp. 14–19. (In Russ.).

9. Осипенко А.Е., Башегуров К.А., Клинов А.С., Осипенко Р.А. Влияние прореживания линейно-селективным способом на ленточные культуры сосны обыкновенной // Леса России и хоз-во в них. 2022. № 3(82). С. 4–16.

Osipenko A.E., Bashegurov K.A., Klinov A.S., Osipenko R.A. The Impact of Line-Selective Thinning on Ribbon Plantations of Scots Pine. *Lesnaya Rossiya i khozyajstvo v nikh* = Forests of Russia and Economy in Them, 2022, no. 3(82), pp. 4–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.51318/FRET.2022.56.44.001>

10. Осипенко А.Е., Клинов А.С. Качественные характеристики деревьев сосны в искусственных древостоях после рубок ухода // Леса России и хоз-во в них. 2022. № 3(82). С. 56–64.

Osipenko A.E., Klinov A.S. Qualitative Characteristics of Pine Trees in Artificial Stands after Improvement Thinning. *Lesnaya Rossiya i khozyajstvo v nikh* = Forests of Russia and Economy in Them, 2022, no. 3(82), pp. 56–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.51318/FRET.2022.99.30.007>

11. Рубцов В.И., Новосельцева А.И., Попов В.К., Рубцов В.В. Биологическая продуктивность в лесостепной зоне. М.: Наука, 1976. 224 с.

Rubtsov V.I., Novoseltseva A.I., Popov V.K., Rubtsov V.V. *Biological Productivity of Scots Pine in Forest Steppe Zone*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 224 p. (In Russ.).

12. Соловьев В.М., Соловьев М.В., Санникова О.Н. Естественнаучные основы рубок ухода по типам строения и формирования древостоев // Вестн. МГУЛ – Лесн. вестн. 2007. № 8. С. 62–67.

Solovyov V.M., Solovyov M.V., Sannikova O.N. Natural Causes of Thinning Operations by the Characters of Stands Morphology and Formation. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2007, no. 8, pp. 62–67. (In Russ.).

13. Чибисов Г.А., Вялых Н.И., Минин Н.С. Рубки ухода за лесом на Европейском Севере: практ. пособие. Архангельск, 2004. 128 с.

Chibisov G.A., Vyalykh N.I., Minin N.S. *Logging of Forest Care in the European North: a Practical Guide*. Arkhangelsk, 2004. 128 p. (In Russ.).

14. Янцев А.В. Выбор статистических критериев. Симферополь: ТНУ, 2012. 138 с.
Yantsev A.V. *The Choice of Statistical Criteria*. Simferopol, TNU Publ., 2012. 138 p. (In Russ.).

15. Ebel A.V., Ebel Y.I., Zalesov S.V., Ayan S. The Effects of Different Intensity of Thinning on the Development in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Stands in Kazakh Uplands. *Alinteri Journal of Agriculture Science*, 2019, vol. 34, no. 2, pp. 182–187. <https://doi.org/10.28955/alinterizbd.639014>

16. Ganbaatar B., Jamsran T., Gradel A., Sukhbaatar G. Assessment of the Effects of Thinnings in Scots Pine Plantations in Mongolia: a Comparative Analysis of Tree Growth and Crown Development Based on Dominant Trees. *Forest Science and Technology*, 2021, vol. 17, iss. 3, pp. 135–143. <https://doi.org/10.1080/21580103.2021.1963326>

17. Hyttiäinen K., Tahvonen O., Valsta L. Optimum Juvenile Density, Harvesting, and Stand Structure in Even-Aged Scots Pine Stands. *Forest Science*, 2005, vol. 51, iss. 2, pp. 120–133. <https://doi.org/10.1093/forestscience/51.2.120>

18. Hyttiäinen K., Tahvonen O. Economics of Forest Thinnings and Rotation Period for Finnish Conifer Cultures. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 17, iss. 3, pp. 274–288. <https://doi.org/10.1080/028275802753742945>

19. Mäkinen H., Isomäki A. Thinning Intensity and Growth of Scots Pine Stands in Finland. *Forest Ecology and Management*, 2004, vol. 201, iss. 2–3, pp. 311–325. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.016>

20. Nilsson U., Agestam E., Ekö P.-M., Elfving B., Fahlvik N., Johansson U., Karlsson K., Lundmark T., Wallentin C. Thinning of Scots Pine and Norway Spruce Monocultures in Sweden – Effects of Different Thinning Programmes on Stand Level Gross- and Net Stem Volume Production. *Studia Forestalia Suecia*, 2010, no. 219. 46 p.

21. Tahvonen O., Pihlainen S., Niinimäki S. On the Economics of Optimal Timber Production in Boreal Scots Pine Stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2013, vol. 43, no. 8, pp. 719–730. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0494>

22. Varmola M., Salminen H. Timing and Intensity of Precommercial Thinning in *Pinus sylvestris* Stands. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 19, iss. 2, pp. 142–151. <https://doi.org/10.1080/02827580310019545>

23. Zalesov S., Dancheva A.V., Ayan S., Suyundikov Z.O., Rachimzhanov A.N., Razhanov M.R., Opletaev A.S. Silvicultural Efficiency of the Thinning Efficiency of *Pinus sylvestris* L. Plantation in the Dry Subzone of Northern Kazakhstan Steppes. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 220–228. <https://doi.org/10.17475/kastorman.849517>

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

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



Научная статья

УДК 624.138.232

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-118-127

Фиброцементогрунт в устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог

С.А. Чудинов, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AEN-3285-2022](https://orcid.org/0000-0003-4492-8188),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37,
г. Екатеринбург, Россия, 620100; chudinovsa@m.usfeu.ru

Поступила в редакцию 10.08.23 / Одобрена после рецензирования 28.10.23 / Принята к печати 01.11.23

Аннотация. Важнейшим фактором увеличения эффективности освоения лесосырьевых баз является развитие и повышение транспортно-эксплуатационного состояния сети лесовозных автомобильных дорог. Инертные дорожно-строительные материалы: песок, щебень, щебеночно- и гравийно-песчаные смеси – традиционно применяются для строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. Однако в районах с дефицитом данных материалов стоимость строительства дорог существенно возрастает. Альтернативной технологией, позволяющей существенно сократить либо полностью исключить применение инертных дорожно-строительных материалов, является укрепление местных грунтов для устройства конструктивных слоев дорожных одежд. Технология укрепления грунтов заключается в их перемешивании с вяжущими веществами и уплотнении при оптимальной влажности смеси, при этом полученный материал приобретает заданные прочность и морозостойкость. Наиболее эффективным и распространенным вяжущим веществом для укрепления грунтов является портландцемент. Однако наряду с высокими прочностными показателями и морозостойкостью цементогрунты в силу кристаллической структуры имеют низкую трещиностойкость, что ухудшает транспортно-эксплуатационные показатели и сокращает срок службы дорожных одежд. В число рациональных решений по повышению надежности укрепления грунтов для строительства дорожных одежд автомобильных дорог входит устройство фиброцементогрунтовых слоев. Предмет исследования – фиброцементогрунт для строительства конструктивных слоев дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог. Цель – улучшение физико-механических показателей и морозостойкости грунтов, укрепленных портландцементом с добавкой фибры на основе базальтового волокна. Проведены лабораторные испытания прочности на сжатие и на растяжение при раскалывании, а также морозостойкости фиброцементогрунтов различных составов в соответствии с ГОСТ Р 70452–2022. Согласно полученным данным, фиброцементогрунт имеет более высокие прочность и морозостойкость по сравнению с цементогрунтом. Волокна фибры, распределенные в объеме цементогрунтовой матрицы, эффективно воспринимают внешние нагрузки, обеспечивая высокие физико-механические показатели, следовательно, и трещиностойкость, а также морозостойкость материала. При-



менение фиброцементогрунта для строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог позволит увеличить долговечность и надежность функционирования таких дорог, снизить издержки на строительство и эксплуатацию дорожно-транспортной инфраструктуры лесосырьевых баз.

Ключевые слова: лесовозные автомобильные дороги, дорожная одежда, фиброцементогрунт, цементогрунт, укрепленный грунт, трещиностойкость, армирование

Для цитирования: Чудинов С.А. Фиброцементогрунт в устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 118–127. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-118-127>

Original article

Fiber Cement Soil in the Construction of Pavements for Logging Roads

Sergey A. Chudinov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AEN-3285-2022](https://orcid.org/0000-0003-4492-8188), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4492-8188>

Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; chudinovsa@m.usfeu.ru

Received on August 10, 2023 / Approved after reviewing on October 28, 2023 / Accepted on November 1, 2023

Abstract. The most important factor in increasing the efficiency of the development of forest tracts is the development and improvement of the transport and operational condition of the network of logging roads. Inert road construction materials, such as sand, crushed stone, crushed stone-sand mixture or gravel-sand mixture, are traditionally used for the construction of pavements for logging roads. However, in the areas with a shortage of these materials, the cost of road construction increases significantly. An alternative technology that can significantly reduce or completely eliminate the use of inert road construction materials is the stabilization of local soils for the construction of pavement structural layers. The soil stabilization technology consists in mixing them with binders and compacting them at the optimal moisture content of the mixture. In doing so, the resulting material acquires the desired strength and frost resistance. The most effective and common binder for soil stabilization is Portland cement. However, along with high strength properties and frost resistance, cement soils, due to their crystalline structure, have low crack resistance, which worsens transport and operational performance and shortens the service life of road pavements. One of the rational solutions for increasing the security of soil stabilization for the construction of road pavements is the installation of fiber cement soil layers. The object of this research is fiber cement soil for the construction of structural layers of road pavements for logging roads. The aim is to improve the physical and mechanical properties and frost resistance of soils stabilized with Portland cement with the addition of the material based on basalt fiber. Laboratory tests of compressive and tensile strength during splitting, as well as frost resistance of fiber cement soils of various compositions were carried out in accordance with GOST R 70452–2022. According to the data obtained, fiber cement soil has higher strength and frost resistance compared to cement soil. The fibers distributed throughout the cement-soil matrix effectively perceive external loads, providing high physical and mechanical indicators, and therefore crack and frost resistance of the material. The use of fiber cement soil for the construction of pavements for logging roads will increase the durability and reliability of

their operation, as well as reduce the costs of construction and operation of road transport infrastructure of forest tracts.

Keywords: logging automobile roads, road pavement, fiber cement soil, cement soil, stabilized soil, crack resistance, reinforcement

For citation: Chudinov S.A. Fiber Cement Soil in the Construction of Pavements for Logging Roads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 118–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-118-127>

Введение

На территории Российской Федерации функционирует около 1,8 млн км лесовозных автомобильных дорог, 49,6 % которых – постоянного действия. Устойчивое развитие транспортной инфраструктуры служит одним из ключевых факторов эффективного освоения лесосырьевых баз. Для этого лесовозные автомобильные дороги постоянного действия с твердым покрытием должны обеспечивать нормативные транспортно-эксплуатационные показатели покрытия и заданный срок службы дорожной одежды при минимальных затратах на строительство и эксплуатацию [9, 13].

Наиболее распространенными дорожно-строительными материалами для устройства дорожных одежд автомобильных дорог являются инертные материалы, такие как щебень, песок, щебеночно- и гравийно-песчаные смеси. Преимущество данных материалов – их технологичность, требующая применения стандартного набора дорожно-строительной техники. Однако территории лесосырьевых баз, как правило, значительно удалены от мест производства и добычи инертных материалов, что приводит к увеличению дальности и удорожанию их транспортировки [6, 15]. В описанных условиях стоимость строительства лесовозных автомобильных дорог из инертных материалов оказывается значительной, что приводит к сокращению протяженности объектов строительства или полному отказу от устройства твердых покрытий и дальнейшей эксплуатации грунтовых дорог [1, 4]. В связи с этим важен поиск технологий, позволяющих строить лесовозные автомобильные дороги с твердым покрытием при минимальных объемах инертных материалов либо без их применения.

Одной из таких технологий является строительство дорожных одежд из местных грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами. Технология заключается в перемешивании грунтов с вяжущими материалами и уплотнении смеси при оптимальной влажности. При этом приготовление смеси может осуществляться на месте выполнения дорожно-строительных работ с помощью горизонтальных смесителей или на стационарных смесительных установках [7, 12, 17].

В качестве наиболее распространенного неорганического вяжущего вещества, используемого для укрепления грунтов, выступает портландцемент. Он позволяет создавать прочную кристаллическую структуру цементогрунта, обеспечивающую при оптимальном составе смеси заданные ГОСТ Р 70452–2022 прочность и морозостойкость. Однако в силу кристаллической структуры цементогрунтовой матрицы конструктивные слои дорожных одежд из данного материала имеют низкую трещиностойкость, что проявляется в виде

поперечных и продольных трещин [10, 11, 19, 20]. Трещины на покрытии не только снижают транспортно-эксплуатационные показатели лесовозных автомобильных дорог, но и сокращают срок службы дорожной одежды в целом, становясь очагами образования на покрытии повреждений (выбоин) и других дефектов. В связи с этим актуальным является совершенствование составов цементогрунтовых смесей для обеспечения не только высоких прочности и морозостойкости цементогрунтов, но и хорошей трещиностойкости [2, 3, 5, 14, 16, 18, 21–25].

Одно из эффективных решений проблемы повышения трещиностойкости цементогрунтов – технология дисперсного армирования цементогрунтовых смесей добавками фибры и получения таким образом фиброцементогрунтовых смесей [8].

Для укрепления цементогрунтовой смеси возможно применять базальтовые волокна (побочный продукт производства базальтовых теплоизоляционных плит), обладающие повышенными прочностью, морозо- и трещиностойкостью.

Цель исследования – разработка оптимальных составов фиброцементогрунтовых смесей на основе базальтовых волокон для применения при устройстве дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог.

Объекты и методы исследования

Фиброцементогрунт – это искусственный строительный композиционный материал, полученный в результате приготовления и уплотнения подобранной в необходимых соотношениях специальной смеси цемента, фиброволокон, грунта и воды (фиброцементогрунтовой смеси).

Благодаря распределенным по всему объему фиброволокнам происходит дисперсное армирование фиброцементогрунтовой смеси. В процессе кристаллообразования цемента фиброволокна прочно удерживаются внутри цементогрунтовой матрицы и воспринимают за счет осевого растяжения внешние нагрузки, воздействующие на фиброцементогрунт. Тем самым значительно увеличиваются прочность фиброцементогрунта на сжатие и в особенности на растяжение при раскалывании, как следствие – возрастает трещиностойкость материала, что улучшает транспортно-эксплуатационные показатели фиброцементогрунтовых дорожных одежд и существенно повышает срок службы лесовозных автомобильных дорог.

Для проведения исследования использовались базальтовые волокна – отходы производства базальтовых теплоизоляционных плит «Тизол» в г. Нижняя Тура Свердловской области. Исходным сырьем для производства базальтовых теплоизоляционных плит являются горные породы базальтовой группы. Технологический процесс получения теплоизоляционных плит заключается в расплавлении сырья, извлечении базальтовых волокон, формовании минераловатного ковра, термообработке, резке и упаковке продукции. На различных стадиях изготовления теплоизоляционных плит образуются отходы в виде базальтовых волокон, которые можно применять в качестве добавки для производства фиброцементогрунта.

Базальтовые волокна являются биологически неактивными, имеют высокую прочность на растяжение – 2100 МПа, химическую стойкость в кислотно-щелочных средах, устойчивы к высоким температурам и огню. За счет этих свойств базальтовые волокна можно эффективно использовать при получении фиброцементогрунтовых смесей.

В состав фиброцементогрунтовых смесей также входили портландцемент ЦЕМ II/В-И 32,5Б по ГОСТ 31108–2020, вода по ГОСТ 51232–98 и грунт – суглинок тяжелый песчанистый, имеющий следующие характеристики:

Удельный вес, т/м ³	1,48
Влажность на границе текучести, % по массе.....	26
Влажность на границе раскатывания, % по массе.....	13
Число пластичности.....	13
Оптимальная влажность, % по массе.....	15
pH.....	6,5
Содержание гумусовых веществ, % по массе.....	1,8

Для исследования были приготовлены серии образцов фиброцементогрунтовой смеси различных составов (см. таблицу).

Составы фиброцементогрунтовых смесей
The compositions of fiber cement soil mixtures

Компонент состава	Доля компонента в составе смеси (% от массы сухого грунта) для серии образцов						
	1	2	3	4	5	6	7
ЦЕМ II/В-И 32,5Б	8						
Базальтовое фиброволокно	0	0,1	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5
Вода	15						

Изготовление образцов для проведения испытаний и лабораторные исследования прочности на сжатие, на растяжение при раскалывании и морозостойкости фиброцементогрунтов различных составов выполнены в соответствии с ГОСТ Р 70452–2022 при сроке набора прочности 28 сут. и полном водонасыщении. Коэффициент морозостойкости определялся при 25 циклах замораживания–оттаивания.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании результатов оценки прочности на сжатие фиброцементогрунтовых образцов в зависимости от содержания фиброволокна (рис. 1), оптимальное содержание базальтовых волокон составило 3,5 % от массы сухого грунта. Прочность на сжатие фиброцементогрунтовых образцов с добавкой 3,5 % фиброволокон от массы сухого грунта возросла на 15,6 % по сравнению с образцами из цементогрунта без добавки.

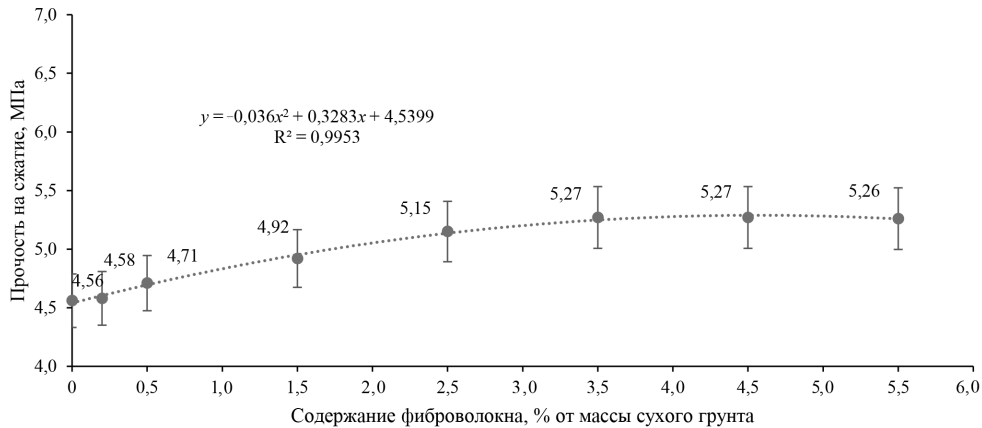


Рис. 1. Зависимость прочности на сжатие фиброцементогрунтовых образцов от содержания фиброволокна

Fig. 1. The dependence of the compressive strength of fiber cement soil samples on the fiber content

Исследование прочности на растяжение при раскалывании также показало, что оптимальное содержание базальтовых волокон – 3,5 % от массы сухого грунта (рис. 2). Прочность на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов с добавкой такого количества фиброволокна возросла на 18,9 % по сравнению с образцами из цементогрунта без добавки.

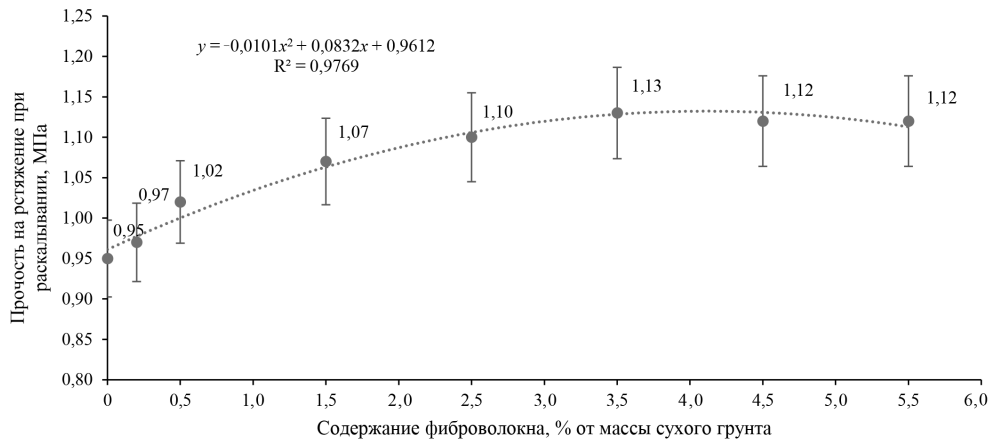


Рис. 2. Зависимость прочности на растяжение при раскалывании фиброцементогрунтовых образцов от содержания фиброволокна

Fig. 2. The dependence of the tensile strength during splitting of fiber cement soil samples on the fiber content

На основании результатов изучения морозостойкости фиброцементогрунтовых образцов в зависимости от содержания фиброволокна (рис. 3), нормативное значение коэффициента морозостойкости (не менее 0,8) наблюдается при содержании фиброволокна не менее 3,5 % от массы сухого грунта. Максимальное значение коэффициента морозостойкости 0,81 заре-

гистрировано при содержании фиброволокна 3,5 % от массы сухого грунта, и оно на 20,9 % выше по сравнению с образцами из цементогрунта без добавки фиброволокна.

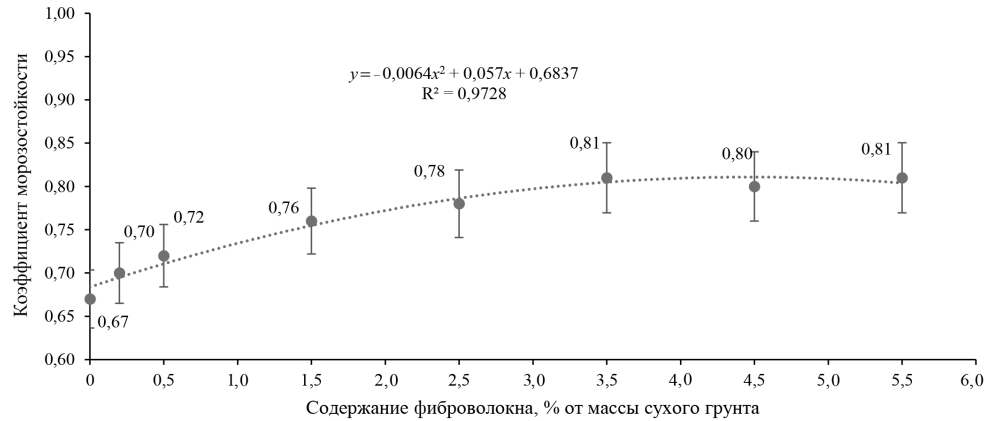


Рис. 3. Зависимость коэффициента морозостойкости фиброцементогрунтовых образцов от содержания фиброволокна

Fig. 3. The dependence of the frost resistance coefficient of fiber cement soil samples on the fiber content

Данные, полученные в ходе исследования прочности на сжатие, на растяжение при раскалывании и морозостойкости фиброцементогрунта, подтверждают эффективность использования добавки фибры на основе базальтовых волокон для дисперсного армирования цементогрунта. Волокна фибры, удерживаясь в объеме цементогрунтовой матрицы, воспринимают воздействующие на материал нагрузки и значительно увеличивают его прочность и морозостойкость. Высокая прочность на растяжение при раскалывании свидетельствует о возросшей трещиностойкости фиброцементогрунтов.

Для достижения максимальных прочностных показателей и морозостойкости фиброцементогрунта оптимальным содержанием добавки фибры на основе базальтовых волокон является 3,5 % от массы сухого грунта.

На основании прочностных показателей цементогрунт без добавки фибры можно отнести к марке М40 А, однако коэффициент морозостойкости – ниже норматива. При этом фиброцементогрунт на основе базальтовых волокон аналогичного состава, имея ту же марку, характеризуется нормативным значением коэффициента морозостойкости – 0,81 и может применяться в верхних слоях основания дорожных одежд капитального типа в условиях II дорожно-климатической зоны.

Выводы

1. Волокна фибры в составе фиброцементогрунта выполняют функцию дисперсного армирования и способствуют значительному росту прочности, морозо- и трещиностойкости материала, что позволяет увеличить срок службы и транспортно-эксплуатационные показатели лесовозных дорог, расположенных в сложных природных условиях и характеризующихся высокими транспортными нагрузками.

2. Фиброцементогрунт с добавкой фибры на основе базальтовых волокон имеет более высокие прочность на сжатие – на 15,6 %, прочность на растяжение при раскалывании – на 18,9 % и коэффициент морозостойкости – на 20,9 %, чем аналогичный по составу цементогрунт без добавки фибры.

3. Оптимальное содержание фибры на основе базальтовых волокон в фиброцементогрунтовой смеси, позволяющее достичь максимальных прочности и морозостойкости фиброцементогрунтов, составляет 3,5 % от массы сухого грунта.

4. Фиброцементогрунт на основе тяжелого песчанистого суглинка с добавкой 8 % портландцемента и 3,5 % базальтового волокна имеет марку М40 А и коэффициент морозостойкости, соответствующий нормативному значению, и может применяться в верхних слоях основания дорожных одежд капитального типа в условиях II дорожно-климатической зоны. Это позволит осуществлять строительство лесовозных автомобильных дорог в отдаленных районах лесосырьевых баз без использования инертных материалов, что даст возможность снизить издержки на строительство и эксплуатацию лесовозной дорожно-транспортной инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бавбель Е.И., Игнатенко В.В., Науменко А.И. Конструирование и методика расчета дорожных одежд из укрепленных грунтов // Тр. БГТУ. Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2016. № 2(184). С. 58–60.

Bavbel J.I., Ignatenko V.V., Naumenko A.I. The Design and Method of Calculation of Pavement of Reinforced Soil. *Trudy BGTU = Proceedings of BSTU*, 2016, no. 2(184), pp. 58–60. (In Russ.).

2. Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф. Исследование долговечности модифицированного цементогрунта дорожного назначения // Пром. и гражд. стр-во. 2014. № 11. С. 76–79.

Vdovin E.A., Mavliev L.F. Research in Durability of Modified Soil Cement of Road Purpose. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, 2014, no. 11, pp. 76–79. (In Russ.).

3. Восканянц К.Е. Разработка составов и технологий укрепления и стабилизации грунтов для автодорожного строительства // Науч. исслед. 2018. № 6(26). С. 23–25.

Voskanyants K.E. Development of the Compositions and Technologies of the Soils Strengthening and Stabilization for Road Construction. *Nauchnye issledovaniya = Scientific Research*, 2018, no. 6(26), pp. 23–25. (In Russ.).

4. Голубева Е.А., Плахотный А.Б. Практика применения дорожного полимерцементогрунта на федеральной трассе «Амур» // Техника и технологии стр-ва. 2017. № 3(11). С. 45–49.

Golubeva E.A., Plakhotny A.B. Practice of the Use of Road Polymer Cement Soil on the Federal Highway “Amur”. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*, 2017, no. 3(11), pp. 45–49. (In Russ.).

5. Коновалова Н.А., Дабижжа О.Н., Панков П.П., Руш Е.А. Утилизация гидролизного лигнина в составах цементогрунтов // Экология и пром-сть России. 2019. Т. 23, № 11. С. 32–37.

Konovalova N.A., Dabizha O.N., Pankov P.P., Rush E.A. Utilization of Hidrolysis Lignin in Compositions Soil-Cements. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 11, pp. 32–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-11-32-37>

6. Лыщик П.А., Плышевский С.В., Науменко А.И. Использование комплексного вяжущего для укрепления грунтов земляного полотна лесных автомобильных дорог // Тр. БГТУ. Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2013. № 2(158). С. 39–42.

Lyshchik P.A., Plyshevskiy S.V., Naumenko A.I. The Use of a Complex Binder to Strengthen the Soils of Forest Road Subgrades. *Trudy BGTU* = Proceedings of BSTU, 2013, no. 2(158), pp. 39–42. (In Russ.).

7. Ольховиков В.М. Строительство дорожных одежд низкой стоимости с основаниями из укрепленных грунтов и тонкослойными покрытиями. М.: Информавтдор, 2003. 84 с.

Olkhovikov V.M. *Construction of Low-Cost Road Pavements with Reinforced Soil Bases and Thin-Layer Pavements*. Moscow, Informavtodor Publ., 2003. 84 p. (In Russ.).

8. Патент 2785742 С1 РФ, МПК E02D 3/12, E01C 3/04, E01C 7/36, C04B 28/04, C04B 111/20. Фиброцементогрунтовая смесь: № 2022105876: заявл. 05.03.2022: опубл. 12.12.2022 / С.А. Чудинов.

Chudinov S.A. *Fiber Cement Soil Mixture*. Patent RF, no. RU 2785742 C1, 2022. (In Russ.).

9. Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Логойда В.С. Исследование отходов промышленности для укрепления грунтов // Фундам. исслед. 2016. № 12-1. С. 102–106.

Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Logoyda V.S. Study of Waste Industry for Strengthening Soil. *Fundamental'nye issledovaniya* = Fundamental Research, 2016, iss. 12-1, pp. 102–106. (In Russ.).

10. Степанец В.Г., Герасимова С.А. Основания дорожных одежд из укрепленных грунтов повышенной прочности и морозоустойчивости // Молодой ученый. 2020. № 22(312). С. 148–154.

Stepanets V.G., Gerasimova S.A. Road Pavement Bases Made of Reinforced Soils of Increased Strength and Frost Resistance. *Molodoj uchenyj* = Young Scientist, 2020, no. 22(312), pp. 148–154. (In Russ.).

11. Федькин А.С. Экспериментальные лабораторные исследования композиционного материала на основе грунта и минерального вяжущего для укрепления грунтов лесных дорог // Тр. БГТУ. Лесн. и деревообраб. пром-сть. 2012. № 2. С. 89–92.

Fed'kin A.S. Experimental Laboratory Studies of a Composite Material Based on Soil and Mineral Binder for Strengthening the Soils of Forest Roads. *Trudy BGTU* = Proceedings of BSTU, 2012, no. 2, pp. 89–92. (In Russ.).

12. Чудинов С.А. Производственные испытания грунтов, укрепленных портландцементом с добавкой полиэлектролита // Изв. вузов. Лесн. журн. 2011. № 6. С. 58–61.

Chudinov S.A. In-Process Testing of the Grounds Reinforced with Portland Cement Containing Polyelectrolyte Additive. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2011, no. 6, pp. 58–61. (In Russ.).

13. Чудинов С.А. Укрепленные грунты в строительстве лесовозных автомобильных дорог: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 174 с.

Chudinov S.A. *Reinforced Soils in the Construction of Logging Roads*: Monograph. Ekaterinburg, USFEU Publ., 2020. 174 p. (In Russ.).

14. Чудинов С.А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса: моногр. Екатеринбург: УГЛТУ, 2022. 164 с.

Chudinov S.A. *Improving the Technology of Soil Stabilization in the Construction of Roads of the Forestry Complex*: Monograph. Ekaterinburg, USFEU Publ., 2022. 164 p. (In Russ.).

15. Чудинов С.А., Булдаков С.И. Теоретические исследования процессов структурообразования глинистых грунтов, укрепленных портландцементом с добавкой полиэлектролита // Изв. вузов. Лесн. журн. 2010. № 5. С. 82–88.

Chudinov S.A., Buldakov S.I. Theoretical Research of Structure Formation Processes of Clay Soils Stabilized by Portland Cement with Polyelectrolyte Additive. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2010, no. 5, pp. 82–88. (In Russ.).

16. Beeghly J., Schröck M. Dredge Material Stabilization Using the Pozzolanic or Sulfo-Pozzolanic Reaction of Lime By-Products to Make an Engineered Structural Fill. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 2010, vol. 3, iss. 1, art. no. 6. Available at: <https://scholarworks.umass.edu/intljssw/vol3/iss1/6/> (accessed: 21.03.24).

17. Brockenbrough R.L. *Highway Engineering Handbook*. New-York, McGraw-Hill, 2009. 885 p.

18. Jones C. Soil Consolidation and Strengthening Using Electrokinetic Geosynthetics – Concepts and Analysis. *Geosynthetics*, 2006, pp. 411–414.

19. Khan M.A., Usmani A., Shah S.S., Abbas H. A Study of Multilayer Soil-Fly Ash Layered System under Cyclic Loading. *International Journal of Civil Engineering*, 2008, vol. 6, no. 2, pp. 73–89.

20. Mavliev L., Bulanov P., Vdovin E., Zaharov V., Gimazov A. Road Soil Cement with Complex Additives Based on Organosilicon Compounds and Electrolytes. *ZKG: Zement-Kalk-Gips International*, 2016, no. 9(69), pp. 49–54.

21. Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R.K. Influence of Fly Ash on Strength Behavior of Typical Soil. *Construction and Building Materials*, 2004, vol. 18, pp. 263–267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.003>

22. Sabri I.L.M. Study on the Impact of Moisture Content on Subgrade Strength. *5th International Symposium 2015 – IntSym 2015, SEUSL*. Sri Lanka, SEUSL Publ., 2015, pp. 71–76.

23. Salour F., Erlingsson S. Permanent Deformation Characteristics of Silty Sand Subgrades from Multistage RLT Tests. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017, vol. 18, iss. 3, pp. 236–246. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1065991>

24. Vijayan D.S. Effect of Solid Waste Based Stabilizing Material for Strengthening of Expansive Soil – A Review. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, vol. 20, art. no. 101108. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101108>

25. Zainorabidin A., Agustina D.H. Effect of Moisture Content of Cohesive Subgrade Soil. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 195, art. no. 03010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819503010>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest

Научная статья

УДК 630*31:621.22

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-128-141

Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного дышла лесовозного автопоезда

В.О. Никонов[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

В.И. Посметьев, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

А.Ю. Мануковский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

В.В. Посметьев, канд. физ.-мат. наук, доц.; ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

И.В. Сизьмин, аспирант; ResearcherID: [IWE-3107-2023](https://orcid.org/0000-0002-9035-515X),


ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9035-515X>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; 8888nike8888@mail.ru[✉], posmetyev@mail.ru, mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru, igorsizmin96@gmail.com

Поступила в редакцию 29.09.23 / Одобрена после рецензирования 18.12.23 / Принята к печати 20.12.23

Аннотация. Рассмотрены основные преимущества и особенности взаимодействия звеньев лесовозного автопоезда при движении в процессе вывозки лесоматериалов по недостаточно обустроенным лесовозным дорогам. На основе анализа результатов выполненных российскими и зарубежными авторами исследований выявлены перспективные пути повышения эффективности работы лесовозных автомобилей с прицепами. Представлены главные недостатки существующих конструкций тягово-сцепных устройств лесовозных автомобилей с прицепами. Предложена усовершенствованная конструкция рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда, обеспечивающая снижение максимальных усилий при динамическом взаимодействии звеньев, повышение надежности автопоезда, возможность рекуперации энергии рабочей жидкости с ее последующим полезным использованием, а также эффект самовытаскивания автопоезда, улучшающий его проходимость в условиях недостаточно обустроенных лесовозных дорог. Выявлено, что оптимальный внутренний диаметр последовательно соединенных свободными торцами 2 гидроцилиндров двухстороннего действия находится в диапазоне 95...105 мм. При таком диаметре рекуперированная мощность достигает 4 кВт, среднее продольное ускорение прицепа находится в диапазоне 0,75...0,83 м/с². Движение лесовозного автопоезда в исследуемых условиях со скоростью 20...60 км/ч сопровождается изменением средней рекуперированной мощности от 1,8 до 11,3 кВт и среднего продольного ускорения прицепа – от 0,2 до 1,4 м/с². Определено, что при средних высотах неровностей опорной поверхности 0,1...0,2 м, характерных для типичных недостаточно обустроенных лесовозных дорог, средняя рекуперированная мощность составляет 2,2...4,1 кВт, среднее продольное ускорение прицепа – 0,26...0,53 м/с². Оптимальный ход рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда равняется 0,55 м, оптимальная скорость удлинения (или укорочения) дышла сцепного устройства –

© Никонов В.О., Посметьев В.И., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., Сизьмин И.В., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

0,28 м/с. При этом обеспечивается средняя скорость самовытаскивания 0,22 м/с, среднее перемещение лесовозного автопоезда 0,11 м за один цикл удлинения (или укорочения) дышла и рекуперированная им мощность 1,75 кВт.

Ключевые слова: лесовозный автомобиль, гидроцилиндр двухстороннего действия, прицеп, рекуперация энергии, функция самовытаскивания, оптимизация параметров, компьютерный эксперимент, картограмма оптимизации, пневмогидроаккумулятор, лесовозная дорога, эффективность системы

Для цитирования: Никонов В.О., Посметьев В.И., Мануковский А.Ю., Посметьев В.В., Сизьмин И.В. Оптимизация конструктивных параметров рекуперативного дышла лесовозного автопоезда // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 128–141. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-128-141>

Original article

Optimization of the Design Parameters of the Regenerative Rod of a Logging Road Train

Vadim O. Nikonov[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Valeryi I. Posmetyev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Andrey Yu. Manukovskii, Doctor of Engineering, Prof.;

ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

Viktor V. Posmetyev, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Igor V. Sizmin, Postgraduate Student; ResearcherID: [IWE-3107-2023](https://orcid.org/0000-0002-9035-515X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9035-515X>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; 8888nike8888@mail.ru[✉], posmetyev@mail.ru, mayu1964@mail.ru, victorvpo@mail.ru, igorsizmin96@gmail.com

Received on September 29, 2023 / Approved after reviewing on December 18, 2023 / Accepted on December 20, 2023

Abstract. The main advantages and peculiarities of the interaction of the links of a logging road train when moving during wood hauling along under-equipped logging roads are considered. Based on the analysis of the results of the research carried out by Russian and foreign authors, promising ways to improve the efficiency of logging trucks with trailers have been identified. The main disadvantages of the existing designs of the devices for coupling logging trucks with trailers have been presented. An improved design of the regenerative pneumohydraulic rod of the coupler of a road train has been proposed, which ensures a reduction in the maximum efforts during the dynamic interaction of the links, an increase in the road train reliability, the possibility of the power fluid energy recovery with its subsequent beneficial use, as well as the effect of self-pulling of the road train, improving its cross-country ability in the conditions of under-equipped logging roads. It has been revealed that the optimal internal diameter of 2 double-acting hydraulic cylinders connected in series with the free ends is within the range of 95 to 105 mm. With such a diameter, the recovered power reaches 4 kW, the average longitudinal acceleration of the trailer is in the range of

0.75 to 0.83 m/s². The movement of a logging road train in the studied conditions at a speed of 20 to 60 km/h is accompanied by a change in the average recovered power from 1.8 to 11.3 kW and the average longitudinal acceleration of the trailer – from 0.2 to 1.4 m/s². It has been determined that at average heights of support surface irregularities of 0.1 to 0.2 m, characteristic of typical under-equipped logging roads, the average recovered power is in the range of 2.2 to 4.1 kW and the average longitudinal acceleration of the trailer is in the range of 0.26 to 0.53 m/s². The optimal stroke of the regenerative pneumohydraulic rod of the coupler of a road train is 0.55 m, the optimal rate of lengthening (or shortening) of the rod is 0.28 m/s. This ensures the average self-pulling speed of 0.22 m/s, the mean displacement of a logging road train of 0.11 m per one cycle of lengthening (or shortening) of the rod and the power recovered by the rod of 1.75 kW.

Keywords: logging truck, double-acting hydraulic cylinder, trailer, energy recovery, self-pulling function, optimization of parameters, computer experiment, optimization cartogram, pneumohydraulic accumulator, logging road, system efficiency

For citation: Nikonov V.O., Posmetyev V.I., Manukovskii A.Yu., Posmetyev V.V., Sizmin I.V. Optimization of the Design Parameters of the Regenerative Rod of a Logging Road Train. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 128–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-128-141>

Введение

Значительная роль в обеспечении бесперебойной работы лесозаготовительных предприятий отводится лесовозному автомобильному транспорту – важнейшему звену лесозаготовительного процесса. Более широкое практическое применение лесовозных автомобилей с прицепами является значительным резервом повышения объемов вывозимых лесовозным автомобильным транспортом лесоматериалов. К отличительным особенностям эксплуатации лесовозных автомобилей с прицепами относят их функционирование в сложных дорожных условиях, характеризующееся преодолением неровностей и препятствий. Эти особенности приводят к ухудшению проходимости машины и прицепа, снижению производительности, большим динамическим нагрузкам между звеньями, сопровождающимся уменьшением надежности и долговечности автопоезда, повышенным расходом топлива и, как следствие, возрастанием себестоимости вывозки лесоматериалов [4].

Анализ результатов проведенных российскими и зарубежными авторами исследований в области повышения эффективности функционирования лесовозных автомобилей с прицепами позволил установить, что значительное улучшение их работы может быть достигнуто за счет: оптимального количества лесовозных автопоездов в автопарке, оснащенных гидроманипуляторами; оптимизации конструктивных и рабочих параметров гидроманипуляторов; синхронности осуществления погрузки, вывозки и разгрузки лесоматериалов; полноты загруженности осей автопоезда, а также равномерности распределения между ними нагрузки; количественного учета изменения весовых характеристик лесоматериалов при их хранении и вывозке в зависимости от природно-климатических условий; обеспече-

ния необходимого уровня обустроенности лесовозных дорог, а также беспрепятственного проезда для выполнения погрузочно-разгрузочных работ; использования глобального позиционирования при определении оптимальных маршрутов вывозки лесоматериалов; применения деталей в конструкции автопоезда, изготовленных из современных легких и долговечных материалов; удаленного контроля изменения технического состояния агрегатов и систем лесовозного автомобиля с прицепом; минимальных простоев в сочетании с более качественными ремонтом и техническим обслуживанием лесовозных автопоездов; задействования в процессе вывозки лесоматериалов специально подготовленных водителей; применения альтернативных видов топлива; преобразования, накопления и повторного полезного использования потенциальной и кинетической энергии массы звеньев автопоезда, рассеиваемой в виде тепла в окружающее пространство [8–20].

Практика эксплуатации лесовозных автомобилей с прицепами свидетельствует о том, что уровень продольных колебаний между лесовозным автомобилем и прицепом является одним из факторов, определяющих скорость движения лесовозного автопоезда, производительность, утомляемость водителя, интенсивность износа и разрушения сопряженных деталей тягово-сцепного устройства, а также деталей ходовой части лесовозного автомобиля и прицепа. Существенное влияние на продольные колебания между лесовозным автомобилем и прицепом оказывает тягово-сцепное устройство, рассеивающее во внешнюю среду тепловую энергию, образующуюся в процессе преодоления сил внешнего и внутреннего трения при динамическом взаимодействии звеньев. Типовые конструкции тягово-сцепных устройств на современных лесовозных автомобилях с прицепами не обеспечивают требуемого снижения динамических нагрузок между звеньями автопоезда при преодолении им неровностей и препятствий. Это является основной причиной неоправданного снижения срока службы дорогостоящих лесовозных автомобилей с прицепами. Таким образом, разработка и усовершенствование существующих конструкций тягово-сцепных устройств для лесовозных автомобилей с прицепами – актуальная область исследований [7].

Для снижения максимальных усилий при динамическом взаимодействии звеньев лесовозного автопоезда авторами предложена конструкция дышла сцепного устройства с функцией самовытаскивания (рис. 1). Использование такого дышла улучшает проходимость лесовозного автопоезда при преодолении неровностей и препятствий, позволяет генерировать и полезно использовать энергию рабочей жидкости, повышает надежность автопоезда за счет демпфирования динамических нагрузок, возникающих между звеньями [5].

Для исследования демпфирования и рекуперации энергии рабочей жидкости предлагаемым устройством, а также установления влияния его конструктивных параметров на эффективность самовытаскивания лесовозного автопоезда целесообразно использовать методы математического и компьютерного моделирования, а также метод многофакторной оптимизации [1–3].

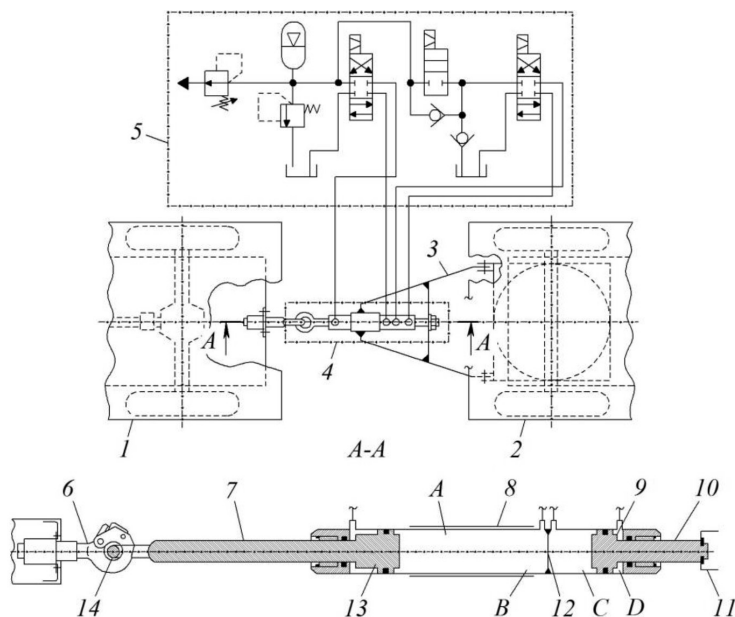


Рис. 1. Схема рекуперативного дышла сцепного устройства с функцией самовытаскивания для лесовозного автомобиля с прицепом: 1 – лесовозный автомобиль; 2 – прицеп; 3 – дышло; 4 – гидроцилиндр; 5 – рекуперативный гидропривод управления; 6 – крюк; A, D и B, C – штоковые и поршневые полости гидроцилиндра соответственно; 7, 10 и 9, 13 – штоки и поршни гидроцилиндра соответственно; 8 – корпус дышла; 11 – поперечина дышла; 12 – герметичная перегородка гидроцилиндра; 14 – соединительное кольцо

Fig. 1. The diagram of the regenerative rod of the coupler with self-pulling function for a logging truck with a trailer: 1 – logging truck; 2 – trailer; 3 – rod; 4 – hydraulic cylinder; 5 – regenerative hydraulic control; 6 – hook; A, D and B, C – rod and head ends of the hydraulic cylinder, respectively; 7, 10 and 9, 13 – rods and pistons of the hydraulic cylinder, respectively; 8 – rod body; 11 – cross-piece of the rod; 12 – sealed bulkhead of the hydraulic cylinder; 14 – connecting ring

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является лесовозный автомобиль с прицепом. Предметом – конструкция дышла сцепного устройства, обеспечивающая эффект самовытаскивания автопоезда, рекуперацию энергии рабочей жидкости и снижение динамических нагрузок на тягач и прицеп. Для изучения особенностей функционирования конструкции дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда разработаны математические модели и компьютерные программы, реализующие эти модели [6].

При анализе эффективности работы рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда применялись

2 показателя: рекуперлируемая мощность N_p и продольное ускорение прицепа $a_{п}$, характеризующее плавность хода лесовозного автопоезда.

Мгновенное значение рекуперлируемой мощности определялось для момента времени t следующим образом:

$$N_p(t) = d_0 \left(\frac{D_{гн}}{D_{гн0}} \right)^2 \left(\frac{dL_{AB}(t)}{dt} \right)^2,$$

где d_0 – эффективный коэффициент демпфирования; $D_{гн}$ – текущий внутренний диаметр последовательно соединенных торцами 2 гидроцилиндров двухстороннего действия (далее – гидроцилиндр дышла) в компьютерном эксперименте; $D_{гн0}$ – внутренний диаметр гидроцилиндра дышла, в базовом варианте $D_{гн0} = 80$ мм; L_{AB} – длина дышла сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом.

Мгновенное продольное ускорение прицепа $a_{п}(t)$, средние рекуперлируемую мощность $N_{p,c}$ и продольное ускорение $a_{п,c}$ прицепа рассчитывали по методике [6].

Для исследования влияния параметров рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда на эффективность самовытаскивания решена задача многофакторной оптимизации (см. таблицу). Факторами оптимизации являлись: ход дышла ΔL сцепного устройства; скорость удлинения (или укорочения) дышла v_d . В качестве критериев оптимизации использовали параметры, определяющие интенсивность процесса самовытаскивания и затраты мощности: среднюю скорость самовытаскивания $v_{св}$; перемещение (откат) назад $x_{от}$ лесовозного автопоезда; потребляемую дышлом сцепного устройства мощность $N_{п}$. Для оптимизации параметров дышла сцепного устройства проведена серия из 9 компьютерных экспериментов, в процессе которых задавали ход дышла – 0,4; 0,8; 1,2 м и скорость удлинения (или укорочения) дышла – 0,1; 0,2; 0,3 м/с.

Результаты компьютерных экспериментов по многофакторной оптимизации геометрических параметров дышла сцепного устройства

The results of computer experiments on multifactor optimization of the geometric parameters of the coupler rod

Ход дышла сцепного устройства, м	Скорость удлинения/ укорочения дышла сцепного устройства, м/с	Средняя скорость самовытаскивания лесовозного автопоезда, м/с	Перемещение назад лесовозного автопоезда, м	Расходуемая дышлом сцепного устройства мощность, кВт
0,4	0,1	0,053	0,189	0,377
	0,2	0,135	0,130	0,929
	0,3	0,225	0,102	1,574
0,8	0,1	0,071	0,229	0,613
	0,2	0,160	0,157	1,509
	0,3	0,255	0,118	2,557
1,2	0,1	0,078	0,270	0,814
	0,2	0,168	0,194	2,005
	0,3	0,265	0,140	3,396

Аналитически задачу оптимизации параметров рекуперативного дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания можно записать в виде следующей системы:

$$\begin{cases} v_{\text{св}}(\Delta L, v_{\text{д}}) \rightarrow \max; \\ x_{\text{от}}(\Delta L, v_{\text{д}}) \rightarrow \min; \Rightarrow \Delta L^{\text{опт}}, v_{\text{д}}^{\text{опт}}, \\ N_{\text{п}}(\Delta L, v_{\text{д}}) \rightarrow \min; \end{cases}$$

где $\Delta L^{\text{опт}}$, $v_{\text{д}}^{\text{опт}}$ – оптимальные ход и скорость удлинения (или укорочения) рекуперативного дышла.

Задача оптимизации считается решенной, если определена область в факторном пространстве $(\Delta L, v_{\text{д}})$, в которой одновременно будут максимальной $v_{\text{св}}$ и минимальными $x_{\text{от}}$ и $N_{\text{п}}$.

На основе полученных в компьютерных экспериментах данных (табл. 1) найдены аналитические выражения для функций $v_{\text{св}}(\Delta L, v_{\text{д}})$, $x_{\text{от}}(\Delta L, v_{\text{д}})$ и $N_{\text{п}}(\Delta L, v_{\text{д}})$. Аналитические выражения имеют вид многочленов 2-го порядка, позволяющих не только интерполировать результаты эксперимента, но и сгладить случайный разброс:

$$v_{\text{св}}(\Delta L, v_{\text{д}}) = -0,051\Delta L^2 + 0,326v_{\text{д}}^2 + 0,094\Delta Lv_{\text{д}} + 0,104\Delta L + 0,701v_{\text{д}} - 0,059;$$

$$x_{\text{от}}(\Delta L, v_{\text{д}}) = 0,001\Delta L^2 + 1,503v_{\text{д}}^2 - 0,248\Delta Lv_{\text{д}} + 0,125\Delta L - 0,95v_{\text{д}} + 0,229;$$

$$N_{\text{п}}(\Delta L, v_{\text{д}}) = -0,274\Delta L^2 + 7,416v_{\text{д}}^2 + 8,658\Delta Lv_{\text{д}} + 0,096\Delta L - 0,356v_{\text{д}} - 0,0022.$$

Данные аналитические выражения можно использовать в инженерной практике для предварительного определения (без выполнения компьютерных расчетов) показателей эффективности рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства по ходу и по скорости движения дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда.

Результаты исследования и их обсуждение

Внутренний диаметр гидроцилиндра рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства с функцией самовытаскивания оказывает значительное воздействие на рекуперированную мощность, а также на плавность хода лесовозного автомобиля с прицепом. Для изучения влияния внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла на исследуемые показатели в специализированной компьютерной программе были выполнены эксперименты. При проведении этих экспериментов в интерфейсную форму программы последовательно вносились в интервале от 60 до 120 мм значения внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла с шагом 10 мм. Выявлено, что оптимальный внутренний диаметр гидроцилиндра дышла составляет

100 мм (рис. 2). При этом обеспечивается рекуперлируемая мощность до 4,05 кВт при среднем продольном ускорении прицепа 0,79 м/с².

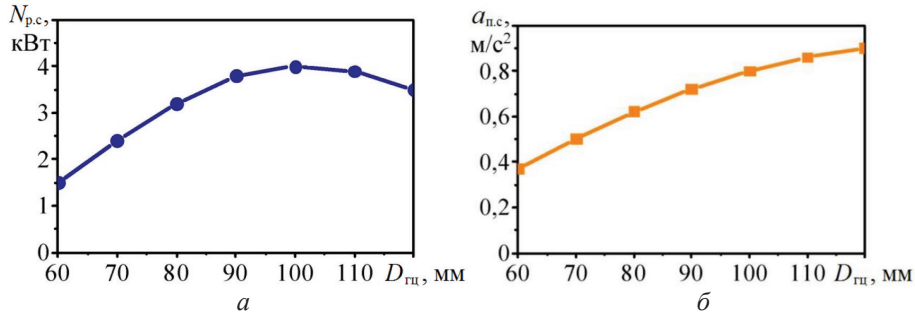


Рис. 2. Графики изменения средних рекуперлируемой мощности (а) и продольного ускорения прицепа (б) при увеличении внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла

Fig. 2. The graphs of changes in the average recovered power (a) and longitudinal acceleration of the trailer (b) with an increase in the inner diameter of the rod hydraulic cylinder

При увеличении внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла требуются большие механические силы для перемещения поршней в таком гидроцилиндре, т. е. повышается эффективная жесткость рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания. Из-за этого снижается рекуперлируемая мощность – с 4,05 до 3,55 кВт при увеличении внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла от 100 до 120 мм, а также возрастает среднее продольное ускорение – от 0,79 до 0,91 м/с².

При меньшем внутреннем диаметре гидроцилиндра дышла ниже объем расходуемой жидкости при том же перемещении поршней в гидроцилиндре, поэтому при уменьшении внутреннего диаметра со 100 до 60 мм рекуперлируемая мощность $N_{р.с.}$ понижается с 4,05 до 1,45 кВт. При аналогичном уменьшении внутреннего диаметра гидроцилиндра дышла падает и продольное ускорение прицепа $a_{п.с.}$ – с 0,79 до 0,38 м/с². Оптимальный внутренний диаметр такого гидроцилиндра дышла составляет 95...105 мм и обеспечивает генерацию рекуперлируемой мощности $N_{р.с.}$, равную 4 кВт. Продольные ускорения прицепа при этом возрастают, достигая 0,83 м/с².

С ростом скорости лесовозного автопоезда, движущегося по неровностям лесовозной дороги, происходит более частое взаимодействие его звеньев между собой, сопровождающееся увеличением количества перемещений поршней в гидроцилиндре дышла. Это приводит к росту генерирования дышлом сцепного устройства рекуперлируемой мощности. Для исследования влияния данного фактора на показатели эффективности выполнена серия компьютерных экспериментов, при проведении которых скорость движения автопоезда увеличивали в интервале 20...60 км/ч с шагом 10 км/ч. Эти эксперименты позволили установить, что рост скорости движения автопоезда с 0 до 40 км/ч сопровождается изменением по степенному закону рекуперлируемой мощности (рис. 3, а). При последующем повышении в компьютерном эксперименте

скорости движения лесовозного автомобиля с прицепом с 40 до 60 км/ч прослеживается снижение темпа увеличения рекуперированной мощности $N_{p.c}$. График, аналогичный показанному на рис. 3, *a*, получен при выполнении компьютерных экспериментов по исследованию изменения среднего ускорения прицепа (рис. 3, *б*). Что касается всего изучаемого диапазона изменения скорости движения лесовозного автопоезда, то рекуперированная мощность $N_{p.c}$ изменяется от 1,8 до 11,3 кВт, а продольное ускорение прицепа $a_{п.с}$ – от 0,2 до 1,4 м/с².

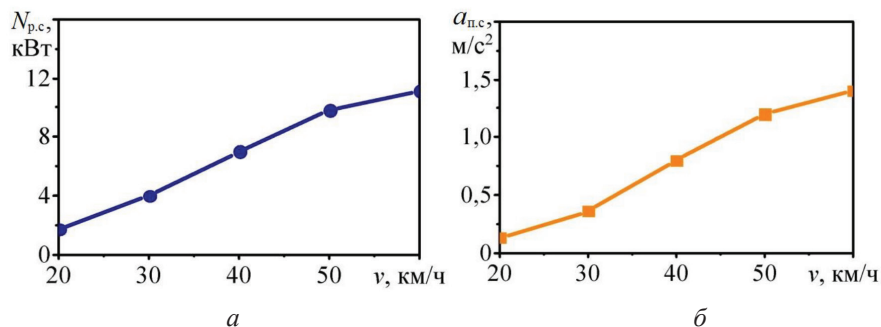


Рис. 3. Графики изменения средних рекуперированной мощности (*a*) и продольного ускорения прицепа (*б*) при увеличении скорости v лесовозного автопоезда

Fig. 3. The graphs of changes in the average recovered power (*a*) and longitudinal acceleration of the trailer (*б*) with an increase in the speed v of the logging road train

С ухудшением уровня обустроенности лесовозной дороги, характеризующимся возрастанием величин неровностей и препятствий на опорной поверхности, можно ожидать большую амплитуду перемещений поршней в гидроцилиндре рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства и, соответственно, большую рекуперированную мощность. Для изучения влияния средней величины неровностей опорной поверхности лесовозной дороги выполнены компьютерные эксперименты, при которых величина неровностей повышалась с шагом 0,1 м в диапазоне 0...0,5 м. Установлено, что изменение рекуперированной дышлом сцепного устройства мощности $N_{p.c}$ при увеличении неровностей опорной поверхности происходит по степенному закону (рис. 4, *a*). Продольное ускорение $a_{п.с}$ изменяется по закону, близкому к линейному (рис. 4, *б*). Анализ данной серии компьютерных экспериментов позволил отметить, что при средних высотах неровностей опорной поверхности 0,1...0,2 м, характерных для типичных недостаточно обустроенных лесовозных дорог, средняя рекуперированная мощность составляет 2,2...4,1 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа – 0,26...0,53 м/с². На всем исследуемом диапазоне неровностей лесовозной дороги при движении по ней лесовозного автопоезда гидроцилиндр дышла сцепного устройства позволяет рекуперировать мощность 1,8...7,5 кВт при среднем продольном ускорении прицепа 0,2...0,8 м/с².

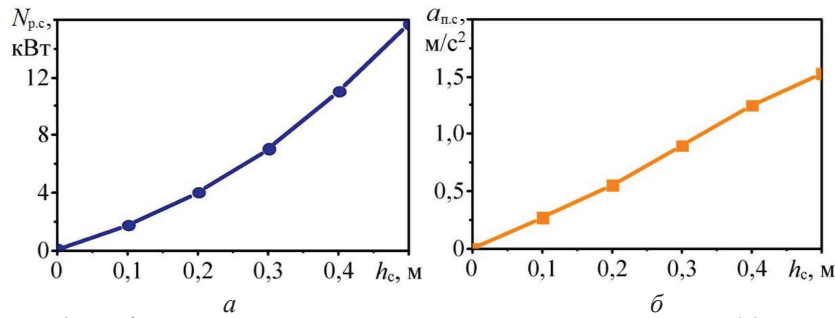


Рис. 4. Графики изменения средних рекуперированной мощности (а) и продольного ускорения прицепа (б) при увеличении средней высоты неровностей h_c лесовозной дороги

Fig. 4. The graphs of changes in the average recovered power (a) and longitudinal acceleration of the trailer (b) with an increase in the average height of irregularities h_c of the logging road

При анализе функций $v_{св}(\Delta L, v_d)$, $x_{от}(\Delta L, v_d)$ и $N_{п}(\Delta L, v_d)$ построены графики (рис. 5) и картограммы (рис. 6), которые позволяют визуально выявить тенденции влияния параметров рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства лесовозного автомобиля с прицепом на показатели его эффективности. Они определены по картограммам оптимизации графоаналитическим методом.

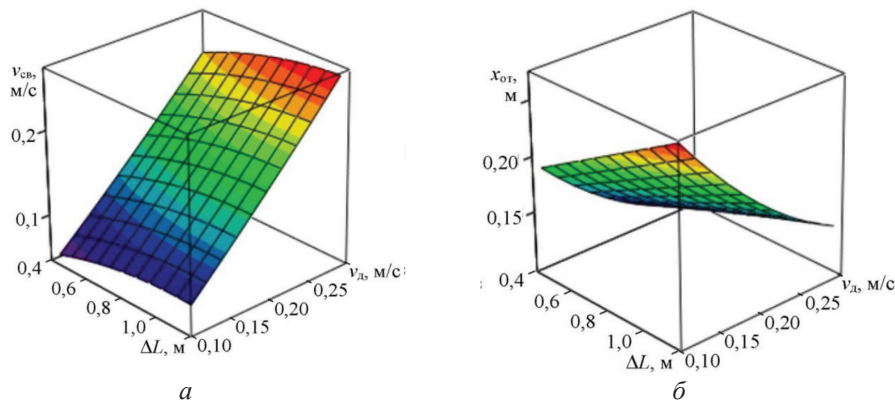
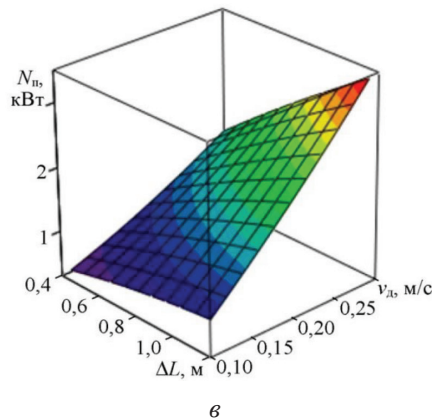


Рис. 5. Графики влияния хода рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства и скорости удлинения (или укорочения) дышла на среднюю скорость самовытаскивания (а), откат лесовозного автопоезда (б) и потребляемую рекуперативным дышлом мощность (в)

Fig. 5. The graphs of the effect of the stroke of the regenerative pneumohydraulic rod of the coupler and the speed of lengthening (or shortening) of the rod on the average self-pulling speed (a), the recoil of the logging road train (b) and the power consumed by the regenerative rod (v)



На рис. 6, *a* приведен пример использования картограммы. Из точек, обозначающих ход дышла 0,6 м (точка *A*) и скорость удлинения (укорочения) дышла 0,2 м/с (точка *B*), проводим перпендикуляры и находим точку их пересечения *C*, размещенную на линии уровня $v_{св} = 0,15$ м/с. Аналогично определяются показатели $x_{от}$ и $N_{п}$.

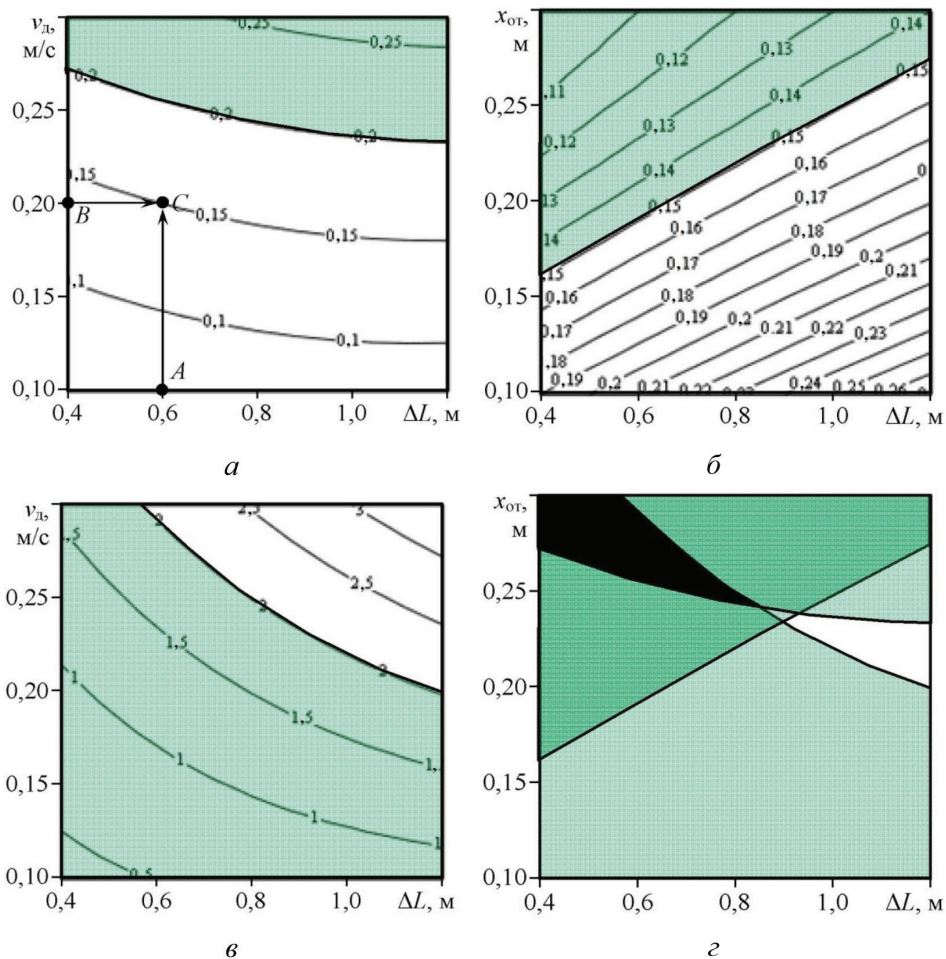


Рис. 6. Картограммы оптимизации: *a* – $v_{св}(\Delta L, v_d)$, м/с; *b* – $x_{от}(\Delta L, v_d)$, м; *c* – $N_{п}(\Delta L, v_d)$, кВт; *d* – оптимальная область

Fig. 6. The optimization cartograms: *a* – $v_{св}(\Delta L, v_d)$, m/s; *b* – $x_{от}(\Delta L, v_d)$, m; *c* – $N_{п}(\Delta L, v_d)$, kW; *d* – optimal area

На каждой из 3 картограмм $v_{св}(\Delta L, v_d)$, $x_{от}(\Delta L, v_d)$ и $N_{п}(\Delta L, v_d)$ можно выделить благоприятную область факторного пространства $(\Delta L, v_d)$, в которой соответствующий критерий имеет наилучшие значения. На картограмме $v_{св}(\Delta L, v_d)$ линия уровня $v_{св} = 0,20$ м/с разграничивает благоприятную и неблагоприятную области (рис. 6, *a*). Основным критерием отнесения области к благоприятной является возможность пересечения областей и формирования достаточно обширной общей оптимальной области (рис. 6, *d*). Для критериев $x_{от}$ и $N_{п}$ в качестве линий уровня, отделяющих друг от друга благо-

приятную и неблагоприятную области, приняты соответственно $x_{от} = 0,15$ м (рис. 6, б) и $N_{п} = 2$ кВт (рис. 6, в).

Полученная оптимальная область (рис. 6, з), обозначенная черным цветом, позволяет заключить, что оптимальный ход дышла сцепного устройства лесовозного автопоезда с функцией самовытаскивания лежит в диапазоне 0,4...0,7 м; оптимальная скорость удлинения (сокращения) дышла сцепного устройства – в диапазоне 0,25...0,30 м/с. Ориентируясь на центр затемненной области, можно рекомендовать в качестве точечных значений оптимальных параметров $\Delta L = 0,55$ м, $v_{д} = 0,28$ м/с. При этом обеспечивается средняя скорость самовытаскивания 0,22 м/с, средний откат лесовозного автопоезда 0,11 м за один цикл удлинения (или укорочения) дышла и рекуперлируемая им мощность 1,75 кВт.

Выводы

Результаты исследования особенностей функционирования рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства при преодолении лесовозным автомобилем с прицепом препятствий и неровностей на временной лесовозной дороге дают возможность сделать следующие выводы.

1. Оптимальный внутренний диаметр гидроцилиндра дышла сцепного устройства с функцией самовытаскивания составляет 95...105 мм. При этом обеспечивается средняя рекуперлируемая мощность 4 кВт при среднем продольном ускорении прицепа 0,75...0,83 м/с². Увеличение скорости движения автопоезда с 20 до 60 км/ч сопровождается ростом рекуперлируемой мощности – с 1,8 до 11,3 кВт и продольного ускорения прицепа – с 0,2 до 1,4 м/с².

2. Анализ серии компьютерных экспериментов позволил установить, что при средних высотах неровностей опорной поверхности 0,1...0,2 м, характерных для типичных недостаточно обустроенных лесовозных дорог, средняя рекуперлируемая мощность составляет 2,2...4,1 кВт, а среднее продольное ускорение прицепа – 0,26...0,53 м/с². На всем исследуемом диапазоне неровностей лесовозной дороги (0...0,5 м) при движении по ней лесовозного автопоезда гидроцилиндр дышла сцепного устройства рекуперлирует мощность 1,8...7,5 кВт при среднем продольном ускорении прицепа 0,2...0,8 м/с².

3. Оптимальный ход рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства автопоезда составляет 0,55 м, оптимальная скорость удлинения (или укорочения) дышла сцепного устройства – 0,28 м/с. При этом обеспечивается средняя скорость самовытаскивания 0,22 м/с, средний откат лесовозного автопоезда 0,11 м за один цикл удлинения–укорочения дышла и потребляемая рекуперативным дышлом мощность 1,75 кВт.

4. Использование предлагаемого рекуперативного пневмогидравлического дышла сцепного устройства позволит снизить максимальные усилия при динамическом взаимодействии звеньев лесовозного автопоезда, повысить его надежность, рекуперировать энергию рабочей жидкости с последующим полезным использованием, а также обеспечит лесовозному автопоезду эффект самовытаскивания, что улучшит его проходимость при преодолении препятствий на временных лесовозных дорогах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planning an Experiment in the Search for Optimal Conditions*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p. (In Russ.).
2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.
Granovskiy V.A., Siraya T.N. *Methods of Processing Experimental Data in Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p. (In Russ.).
3. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: Раско, 1991. 272 с.
Mudrov A.E. *Numerical Methods for PC in Terms of Basic, Fortran and Pascal*. Tomsk, MP "RASKO" Publ., 1991. 272 p. (In Russ.).
4. Никонов В.О. Современное состояние, проблемы и пути повышения эффективности лесовозного автомобильного транспорта. Воронеж: ВГЛТУ, 2021. 203 с.
Nikonov V.O. *Current State, Problems and Ways to Improve the Efficiency of Timber Road Transport*. Voronezh, VSUFT Publ., 2021. 203 p. (In Russ.).
5. Патент № 2784227 С1 РФ, МПК В60D 1/14, В60D 1/145, В60D 1/155. Рекуперативное пневмогидравлическое дышло сцепного устройства автопоезда с функцией самовытаскивания: № 2022124514; заявл. 16.09.2022; опублик. 23.11.2022 / В.И. Посметьев, В.О. Никонов, В.В. Посметьев, И.В. Сизьмин.
Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V., Sizmin I.V. *Regenerative Pneumohydraulic Rod of the Coupler of A Road Train with Self-Pulling Function*. Patent RF, no. RU 2784227 C1, 2022. (In Russ.).
6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Сизьмин И.В. Имитационная модель оценки эффективности лесовозного автопоезда, оснащенного рекуперативным пневмогидравлическим тягово-сцепным устройством // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 4(40). С. 181–196.
Posmeteyev V.I., Nikonov V.O., Posmeteyev V.V., Sizmin I.V. Simulation Model for Estimation of Forest Truck Performance Equipped with Recuperative Spring-Hydraulic Fifth-Wheel Coupling. *Lesotekhnicheskij Zhurnal = Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 4(40), pp. 181–196. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/15>
7. Посметьев В.И., Никонов В.О., Сизьмин И.В. Повышение эффективности лесовозного автопоезда путем использования рекуперативного пневмогидравлического сцепного устройства // Воронеж. науч.-техн. вестн. 2022. Т. 4, № 4(38). С. 70–85.
Posmetev V.I., Nikonov V.O., Siz'min I.V. Improving the Efficiency of the Forest Trading by Using a Recuperative Pneumatic Hydraulic Coupling Device. *Voronezhskij nauchno-tehnicheskij vestnik = Voronezh Scientific-Technical Bulletin*, 2022, vol. 4, no. 4(38), pp. 70–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/2311-8873-2022-70-85>
8. Alrejjal A., Ksaibati K. Impact of Crosswinds and Truck Weight on Rollover Propensity when Negotiating Combined Curves. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2022, vol. 12, iss. 1, pp. 86–102. <http://doi.org/10.1016/j.ijst.2022.01.001>
9. Bako S., Ige B., Nasir A., Musa N.A. Stability Analysis of a Semi-Trailer Articulated Vehicle: A Review. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 2021, vol. 5, iss. 2, pp. 131–140. <http://doi.org/10.30939/ijastech.855733>
10. Brown M.W. Evaluation of the Impact of Timber Truck Configuration and Tare Weight on Payload Efficiency: An Australian Case Study. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 7, art. no. 855. <http://doi.org/10.3390/f12070855>

11. Ghaffariyan M.R., Barrier C., Brown M.W., Kuehmaier M., Acuna M. A Short Review of Timber Truck Fuel Consumption Studies. *Australian Forests Operations Research Alliance (AFORA) Industry Bulletin*, 2018, vol. 21.

12. Johannes E., Ekman P., Hüge-Brodin M., Karlsson M. Sustainable Timber Transport – Economic Aspects of Aerodynamic Reconfiguration. *Sustainability*, 2018, vol. 10, no. 6, art. no. 1965. <http://doi.org/10.3390/su10061965>

13. Kogler C., Stenitzer A., Rauch P. Simulating Combined Self-Loading Truck and Semitrailer Truck Transport in the Wood Supply Chain. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 12, art. no. 1245. <http://doi.org/10.3390/f11121245>

14. Korpinen O.-J., Aalto M., Venäläinen P., Ranta T. Impacts of a High-Capacity Truck Transportation System on the Economy and Traffic Intensity of Pulpwood Supply in Southeast Finland. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2019, vol. 40, iss. 1, pp. 89–105.

15. Lachini E., Fiedler N., Silva G., Pinheiro C., Carmo F. Operational Analysis of Forestry Transportation Using Self-Loading Trucks in a Mountainous Region. *Floresta e Ambiente*, 2018, vol. 25, iss. 4, art. no. e20150060. <http://doi.org/10.1590/2179-8087.006015>

16. Mitrofanovs I., Cekule M. Effective Collaboration Research Project on IT Solution for Automatic Measurement of Timber Assortment. *Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2019, vol. 17, no. 2, pp. 78–83.

17. Monti C.A.U., Gomide L.R., Oliveira R.M., Franca L.C.J. Optimization of Wood Supply: The Forestry Routing Optimization Model. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2020, vol. 92, iss. 3, art. no. e20200263. <http://doi.org/10.1590/0001-3765202020200263>

18. Moreno G., Manenti V., Guerero G., Nicolazzi L., Vieira R., Martins D. Stability of Heavy Articulated Vehicles: Effect of Load Distribution. *Transportation Research Procedia*, 2018, vol. 33, pp. 211–218. <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.10.094>

19. Schettino S., Minette L.J., Schettino C.F., Reboleto I.D. Feasibility Analysis of the Use of Light and Medium Trucks in Timber Transport in Rural Properties. *Revista Árvore*, 2018, vol. 42, iss. 6, art. no. e420608. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000600008>

20. Trzeciński G., Moskalik T., Wojtan R. Total Weight and Axle Loads of Truck Units in the Transport of Timber Depending on the Timber Cargo. *Forests*, 2018, vol. 9, no. 4, art. no. 164. <http://doi.org/10.3390/f9040164>

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



Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-142-151

Древесно-композитные плиты с низким коэффициентом линейного теплового расширения

В.Н. Ермолин, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

М.А. Баяндин[✉], канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

А.В. Намятов, ст. преподаватель; *ResearcherID*: [AAE-8478-2019](https://orcid.org/0000-0002-5568-8725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5568-8725>

Н.В. Смертин, аспирант; *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0003-1566-669X>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru[✉], namyatov2010@yandex.ru, kolya.smertin@mail.ru

Поступила в редакцию 02.04.23 / Одобрена после рецензирования 01.07.23 / Принята к печати 02.07.23

Аннотация. В целом ряде отраслей промышленности требуются материалы с низким коэффициентом линейного теплового расширения, в частности при производстве спутниковых сферических антенн. Последние формируют из композитов, содержащих углеродные волокна и синтетические смолы. Отверждение композиции происходит за счет нагревания до 180 °С. Это приводит к тепловому расширению формы и изменению геометрических характеристик изделия, поэтому к материалам для изготовления форм предъявляются специфические требования. Высокая стоимость специальных материалов, используемых для форм, предопределяет необходимость поиска других материалов с низким коэффициентом линейного теплового расширения. Древесина является возможным решением данной проблемы. Ее коэффициент линейного теплового расширения вдоль волокон меньше, чем у подавляющего большинства материалов, и составляет примерно $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что сопоставимо со специальными материалами. Однако расширение древесины поперек волокон значительно выше продольного, что исключает применение массивной древесины. Анизотропию можно уменьшить за счет создания композита, волокна в котором равномерно ориентированы во всех структурных направлениях, что позволит снизить температурные деформации, приблизив значение расширения древесины поперек волокон к значению расширения вдоль волокон. При традиционном подходе к получению древесных композитов, основанном на использовании синтетических адгезивов, не удастся достичь заметного снижения теплового расширения из-за высокого коэффициента линейного теплового расширения клеев. Перспективным является применение плит из гидродинамически активированных древесных частиц без связующих веществ. Проведены 3 серии опытов: с варьированием плотности плит, предварительной термической модификацией исходной древесины

© Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Намятов А.В., Смертин Н.В., 2024



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

и использованием щелочи при гидродинамической обработке. Исследование теплового расширения проводилось на индукционном dilatометре NETZSCH DIL-402 С в динамическом режиме со скоростью нагрева 2 К/мин. Установлено, что с увеличением плотности тепловое расширение возрастает. Средний коэффициент линейного теплового расширения при плотности 950 кг/м³ составляет $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а при плотности 1100 кг/м³ – $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При сопоставимой плотности тепловое расширение плит без связующих веществ значительно ниже, чем у древесноволокнистых плит (МДФ). Предварительная термическая модификация древесины существенно не влияет на коэффициент линейного теплового расширения плит. Также не влияет и использование щелочи в процессе гидродинамической обработки.

Ключевые слова: механоактивация, коэффициент линейного теплового расширения, КЛТР, оснастка, древесные плиты без связующих веществ, гидродинамическая обработка, композит

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва по проекту «Исследование механизма структурообразования органоминеральных композитов с низким КЛТР».

Для цитирования: Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Намятов А.В., Смертин Н.В. Древесно-композитные плиты с низким коэффициентом линейного теплового расширения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 142–151. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-142-151>

Original article

Wood-Composite Boards with a Low Coefficient of Linear Thermal Expansion

Vladimir N. Ermolin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

Mikhail A. Bayandin, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

Alexey V. Namyatov, Senior Lecturer; ResearcherID: [AAE-8478-2019](https://orcid.org/0000-0002-5568-8725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5568-8725>

Nikolay V. Smertin, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1566-669X>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru, namyatov2010@yandex.ru, kolya.smertin@mail.ru

Received on April 2, 2023 / Approved after reviewing on July 1, 2023 / Accepted on July 2, 2023

Abstract. A number of industries require materials with a low coefficient of linear thermal expansion (CLTE), in particular, in the production of satellite spherical antennas. The latter are formed from composites containing carbon fibers and synthetic resins. The composition is cured by heating up to 180 °C. This leads to a thermal expansion of the mold and a change in the geometric characteristics of the product. Therefore, specific requirements are imposed on the materials for making molds. The high cost of special materials used for molds determines the need to search for other materials with a low CLTE. Wood is a possible solution to this problem. Its CLTE along the fibers is less than that of the vast majority of materials, and is approximately $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, which is comparable to special materials. However, the expansion

of wood across the fibers is much higher than the longitudinal one, which excludes the use of solid wood. Anisotropy can be reduced by creating a composite in which the fibers are uniformly oriented in all structural directions, bringing the value of wood expansion across the fibers closer to the value of expansion along the fibers. The traditional approach to producing wood composites, based on the use of synthetic adhesives, fails to achieve a noticeable reduction in thermal expansion due to the high CLTE of adhesives. The use of boards made of hydrodynamically activated wood particles without binders is promising. Three series of experiments have been carried out: with varying the density of the boards, preliminary thermal modification of the original wood and the use of alkali during hydrodynamic processing. The thermal expansion study has been carried out using the NETZSCH DIL-402 C induction dilatometer in dynamic mode with a heating rate of 2 K/min. It has been established that thermal expansion increases with increasing density. The average CLTE at a density of 950 kg/m³ is $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ and at a density of 1,100 kg/m³ it is $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. At a comparable density, the thermal expansion of boards without binders is significantly lower than that of fiberboards (MDF). Preliminary thermal modification of wood does not significantly affect the CLTE of the boards. The use of alkali in the hydrodynamic treatment also has no effect.

Keywords: mechanical activation, coefficient of linear thermal expansion, CLTE, tooling, wood boards without binders, hydrodynamic processing, composite

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology on the project “The Study of the Mechanism of Structure Formation of Organomineral Composites with a Low CLTE”.

For citation: Ermolin V.N., Bayandin M.A., Namyatov A.V., Smertin N.V. Wood-Composite Boards with a Low Coefficient of Linear Thermal Expansion. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 142–151. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-142-151>

Введение

Развитие различных отраслей промышленности предопределяет необходимость создания новых материалов с заданными свойствами. Одним из таких свойств является линейное тепловое расширение. В ряде отраслей, например микроэлектронике, приборостроении, космическом машиностроении, существует большой спрос на материалы с минимальным коэффициентом линейного теплового расширения (КЛТР). Это обусловлено необходимостью обеспечения требуемой точности изготовления изделий, т. к. иначе невозможно получить заданные технические характеристики. Точность изготовления важна и для сферических спутниковых антенн. Их производят методом формования из композитов, содержащих углеродные волокна и синтетические смолы. С целью отверждения композиции предусмотрено нагревание до 180 °С. Это приводит к тепловому расширению формы и, соответственно, изменению геометрических параметров изделия. Следовательно, материал формы должен иметь низкий КЛТР. У широко распространенных материалов КЛТР (10^{-6} K^{-1}) составляет: алюминий – 22, сталь – 18, полимеры – >40. Поэтому они, как и подавляющее большинство других материалов, не могут использоваться для изготовления форм.

В настоящее время в подобных производствах применяются инварные и прецизионные сплавы, а также различные углеродсодержащие композиты в комбинации с синтетическими смолами [7]. Данные материалы характеризуются низким КЛТР ($\geq 3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), но их высокая стоимость предопределяет необходимость поиска более доступных материалов.

Возможным решением данной проблемы является использование древесины. Изучение ее теплового расширения проводилось неоднократно. Одни из первых исследований по измерению КЛТР древесины хвойных и лиственных пород в тангенциальном и продольном направлениях проведены Е. Villari [20]. Однако ученым не учитывалось изменение влажности древесины (соответственно, влажностные деформации) при нагреве в воздушной среде. О. Hendershot [16] доказал, что влажностные деформации оказывают существенное влияние на КЛТР. В настоящее время получено достаточно большое количество данных по КЛТР для древесины [1, 8] при разной влажности – от абсолютно сухого состояния до влажности выше предела насыщения клеточных стенок. В работе [1] установлен КЛТР для пихты Дугласа в радиальном ($\alpha_r = 27 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и тангенциальном ($\alpha_t = 45 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) направлениях. При этом выявлено, что тепловое расширение вдоль волокон значительно меньше, чем поперек. Также отмечено, что при влажности выше предела насыщения клеточных стенок α_r и α_t очень малы и имеют отрицательные значения (наблюдается уменьшение размеров материала) в температурном диапазоне $0 \dots 65 \text{ }^\circ\text{C}$. При температуре выше $65 \text{ }^\circ\text{C}$ КЛТР приобретает положительные значения. По мнению О.Р. Hendershot [16], изменение размеров древесины обусловлено достижением термодинамического равновесия между целлюлозой и водой, приводящего к миграции воды из целлюлозы в объемную фазу. КЛТР вдоль волокон древесины в сухом состоянии значительно меньше, чем поперек волокон, и равняется $(3,1 \dots 4,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ независимо от плотности древесины [3]. Такое низкое значение, сопоставимое со значением для специализированных материалов, говорит о целесообразности применения древесины при решении обозначенной задачи. Однако высокая анизотропия характеристик вдоль и поперек волокон не позволяет использовать массивную древесину для изготовления форм.

Одним из возможных вариантов устранения этой проблемы является создание композита, волокна в котором равномерно ориентированы во всех структурных направлениях, что позволит снизить температурные деформации, приблизив значения КЛТР поперек волокон к значениям вдоль волокон.

Исследования КЛТР древесных плит проведены О.А. Киселевой [10]. Древесноволокнистые плиты (MDF) при плотности 850 кг/м^3 имеют коэффициент термического расширения $(1,5 \dots 1,8) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. У древесностружечных плит плотностью 670 кг/м^3 данный показатель существенно выше и варьирует в пределах $(11,1 \dots 11,7) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Как следует из полученных результатов, коэффициент у древесностружечных плит более чем в 2 раза превосходит коэффициент для массивной древесины поперек волокон. Вероятно, это обусловлено значительным количеством в древесных плитах полимерных связующих веществ, обладающих более высоким тепловым расширением, чем у древесины.

Таким образом, искомым композитом могут стать древесные плиты, структурообразование которых происходит без связующих веществ за счет аутогезионных взаимодействий между частицами [16]. Получение этих плит основано на предварительной гидродинамической активации древесины [15]. В результате данной обработки наблюдается фибриллирование древесных частиц и, соответственно, увеличение межфазных поверхностей, на которых присутствуют активные функциональные группы, ранее участвовавшие в образовании надмолекулярных структур. При удалении воды соседние частицы этих

групп взаимодействуют с последующим формированием связанной структуры. Плиты имеют достаточно высокие механические свойства и низкую анизотропию, что создает предпосылки для получения материала с малым тепловым расширением [9, 10].

Другим возможным направлением уменьшения теплового расширения является модифицирование древесинного вещества, представляющего собой армированную полимерную композицию [12, 14]. Авторами работ [2, 4, 11, 13, 17, 18] проведены измерения теплового расширения древесной целлюлозы методом рентгеновской дифрактометрии. Установлен КЛТР древесной целлюлозы при изменении температуры от 20 до 200 °С по трем основным направлениям: тангенциальному – $13,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, радиальному – $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и вдоль волокон – $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Как видим, закономерности теплового расширения такие же, как у массивной древесины. При этом у лигнина, как показано в работе М. Ramiah, D. Goring [19], КЛТР вне зависимости от структурного направления составляет $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что значительно ниже, чем у древесины. Таким образом, направленное изменение древесинного вещества может повлиять на его тепловое расширение.

Цель работы – изучение КЛТР композитов на основе гидродинамически активированного древесного сырья.

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось с использованием древесных плит из предварительно гидродинамически активированных древесных опилок хвойных пород, без связующих веществ. Были проведены 3 серии опытов. В 1-й изготавливались плиты плотностью 950 и 1100 кг/м³ по методике, подробно описанной в работах [5, 6, 11]. Во 2-й серии опилки перед гидродинамической обработкой подвергались термической модификации в течение 5 ч при температуре 200 °С. Плотность плит, полученных в данной серии опытов, – 950 кг/м³. В 3-й серии экспериментов при гидродинамической обработке применялся 7,5%-й водный раствор NaOH. Плотность плит также составляла 950 кг/м³. Все экспериментальные запрессовки плит выполнялись на лабораторном гидравлическом прессе марки LabPro 1000. Полученные плиты выдерживались при нормальных условиях не менее 72 ч, затем обрезались по формату и раскраивались на образцы для испытаний.

Тепловое расширение образцов исследовалось в диапазоне температур 20...160 К на индукционном dilatометре NETZSCH DIL-402 С в динамическом режиме со скоростью нагрева 2 К/мин. Измерения проводились при продувке (50 мл/мин) сухим гелием (объемная концентрация O₂ – не более 0,05 %). Нагрузка штока на образец – 30 сН. Для калибровки и учета теплового расширения измерительной системы использовались эталоны из плавленого кварца.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования КЛТР плит плотностью 950 и 1100 кг/м³ представлены на рис. 1.

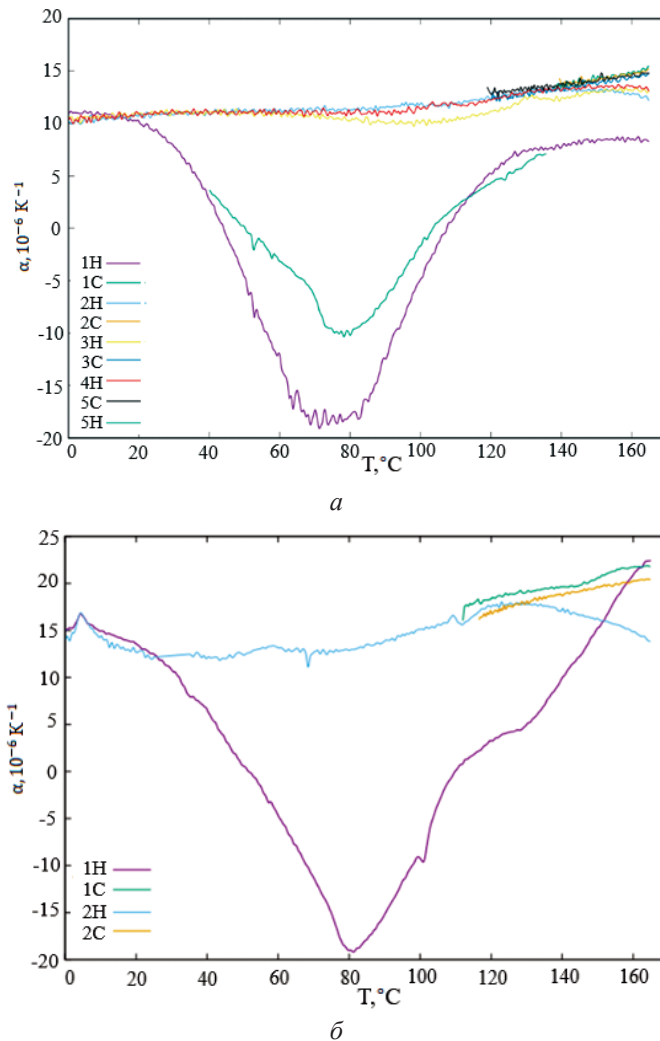


Рис. 1. Зависимость КЛТР древесных плит без связующих от температуры среды (Т): а – плиты плотностью 950 кг/м³; б – плиты плотностью 1100 кг/м³ (Н – нагрев; С – охлаждение; 1–5 – номер операции по порядку)

Fig. 1. The dependence of the CLTE value of the wood boards without binders on the medium temperature (Т): а – the boards with a density of 950 kg/m³; б – the boards with a density of 1,100 kg/m³ (Н – heating; С – cooling; 1–5 – the number of the operation in order)

Как видно из рис. 1, при 1-м нагреве плит до 80 °С вне зависимости от плотности образца КЛТР имеет отрицательные значения. При дальнейшем увеличении температуры наблюдается обратный эффект. Это во многом обусловлено влажностными деформациями (усушкой) материала на данном этапе. При последующих циклах нагревания и охлаждения КЛТР стабилизируется и существенно не изменяется. У плит плотностью 1100 кг/м³ (рис. 1, б) его зна-

чения варьируют в интервале $(12...22) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; у плит плотностью 950 кг/м^3 – $(10...14) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (рис. 1, *a*). Следует отметить, что небольшое увеличение плотности приводит к повышению КЛТР более чем на 40 %. Но дальнейшее снижение плотности ограничено допустимой шероховатостью поверхностей, получаемых при фрезеровании плит в процессе изготовления форм. В целом КЛТР у плит без связующих при сопоставимой плотности существенно ниже, чем у плит MDF. По сравнению с древесностружечными плитами полученные плиты при значительно большей плотности имеют КЛТР на порядок меньше.

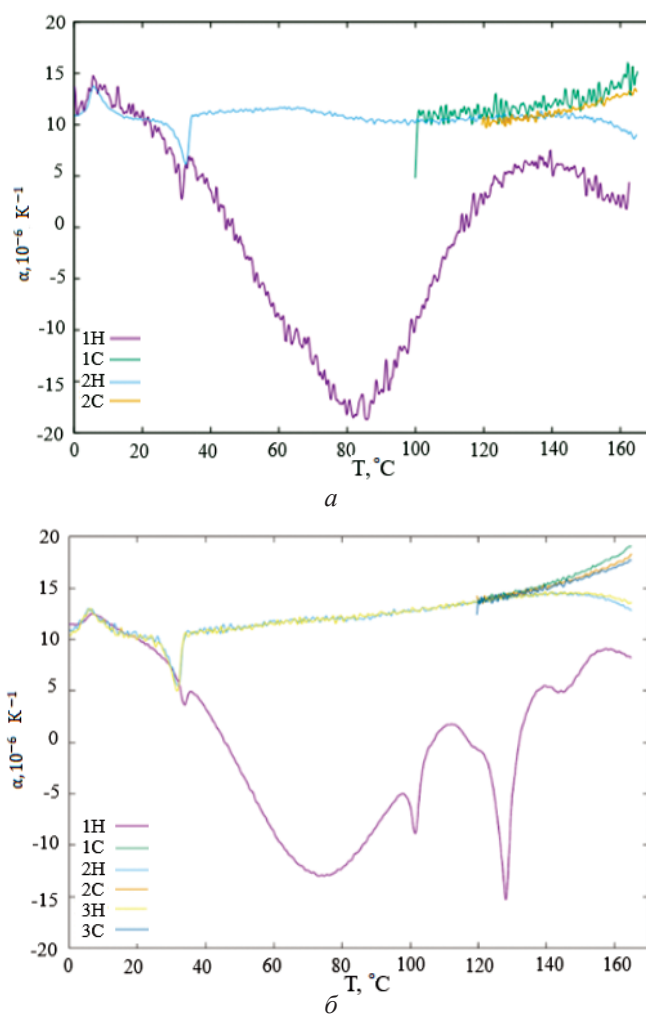


Рис. 2. Зависимость КЛТР от температуры (T) среды для плит: *a* – из термообработанной древесной массы; *б* – из древесной массы, обработанной щелочью (обозначения – см. рис. 1)

Fig. 2. The dependence of the CLTE value on the medium temperature (T) for the boards: *a* – made of the heat-treated wood mass; *б* – made of the wood mass treated with alkali (for the symbols see fig. 1)

Для плит из термически модифицированных опилок КЛТР варьирует в пределах $(11...15) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (рис. 2, а, см. с. 148). При модификации древесной массы щелочью значения КЛТР лежат в большем диапазоне – $(11...19) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (рис. 2, б, см. с. 148). Такие результаты говорят об отсутствии ощутимого эффекта снижения теплового расширения при использовании этих способов модификации древесной массы. Хотя следует отметить улучшение механических и технологических свойств плит, что является предметом дальнейших исследований.

Выводы

1. Использование плит из гидродинамически активированных древесных частиц без связующих веществ является перспективным решением проблемы получения материалов с низким коэффициентом линейного теплового расширения.

2. Коэффициент линейного теплового расширения плит без связующих веществ значительно зависит от плотности плит. При ее увеличении коэффициент возрастает.

3. Средний коэффициент линейного теплового расширения исследуемых плит при большей плотности (950 кг/м^3) ниже, чем у древесноволокнистых плит MDF (плотность – 850 кг/м^3), и составляет соответственно $10 \cdot 10^{-6}$ и $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

4. Термообработка исходных древесных опилок, а также применение NaOH при гидродинамической обработке не оказывают существенного влияния на термическое расширение плит.

5. Полученные значения коэффициента линейного теплового расширения для плит без связующих плотностью 950 кг/м^3 указывают на возможность использования таких плит в качестве основы форм для производства крупногабаритных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров. СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2010. 624 с.

Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. *Chemistry of Wood and Synthetic Polymers*. St. Petersburg, Moscow, Krasnodar, Lan' Publ., 2010. 624 p. (In Russ.).

2. Алашкевич Ю.Д., Васютин В.Г., Емельянов С.В., Кадочкина И.А. Влияние кавитационных сил на размол волокон в безножевой установке // Переработка растительного сырья и утилизация отходов: сб. тр. Красноярск, 1995. Вып. 2. С. 158–161.

Alashkevich Yu.D., Vasyutin V.G., Emel'yanov S.V., Kadochkina I.A. The Influence of Cavitation Forces on Fiber Grinding in a Knifeless Plant. *Processing of Plant Materials and Waste Disposal: Collected Papers*. Krasnoyarsk, 1995, iss. 2, pp. 158–161. (In Russ.).

3. Баяндин М.А., Ермолин В.Н., Елисеев С.Г. Влияние механоактивации на аутогезионные свойства древесины // Хвойные бореал. зоны. 2013. Т. XXI, № 1–2. С. 159–163.

Bayandin M.A., Ermolin V.N., Eliseev S.G. The Influence of Mechanical Activation on the Autohesive Properties of Wood. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2013, vol. XXI, no. 1–2, pp. 159–163. (In Russ.).

4. Белоглазов А.П., Габов А.В., Елистратов В.И. Перспективы конструирования оправок с малым КЛТР для изготовления рефлекторов // Решетнев. чтения. 2014. Ч. 1. С. 49–50.

Beloglazov A.P., Gabov A.V., Elistratov V.I. Prospects of Mandrels Designing with Small Thermal Expansion Coefficient for Manufacturing Reflectors. *Reshetnevskiy chetniya* = Reshetnev Readings, 2014, part 1, pp. 49–50. (In Russ.).

5. Биткин В.Е., Жидкова О.Г., Комаров В.А. Выбор материалов для изготовления размеростабильных несущих конструкций // Вестн. Самар. ун-та. Аэрокосм. техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 1. С. 100–117.

Bitkin V.E., Zhidkova O.G., Komarov V.A. Choice of Materials for Producing Dimensionally Stable Load-Carrying Structures. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye* = Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 100–117. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2541-7533-2018-17-1-100-117>

6. Бокщанин Ю.Р. Новое в лесопилении и использовании отходов за рубежом. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 122 с.

Bokshchanin Yu.R. *Novelties in Sawmilling and Waste Management Abroad*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 122 p. (In Russ.).

7. Вараксин Ф.Д., Ступнев Г.К. Основные направления технического прогресса лесной и деревообрабатывающей промышленности. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 400 с.

Varaksin F.D., Stupnev G.K. *Forest and Woodworking Industries Main Progressive Development Trends*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. 400 p. (In Russ.).

8. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казизин С.Н., Намятов А.В. Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 148–157.

Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V. Structure Formation of Low-Density Boards from Hydrodynamically Activated Softwood Waste. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 5, pp. 148–157. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.148>

9. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казизин С.Н., Намятов А.В., Острякова В.А. Водостойкость древесных плит, получаемых без использования связующих веществ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 3. С. 151–158.

Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V., Ostryakova V.A. Water Resistance of Wood-Based Panels Made without Binders. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 3, pp. 151–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-151-158>

10. Киселева О.А., Ярцев В.П. Влияние плотности на термическое расширение древесных плит // Актуальные проблемы современного строительства: сб. тр. Пенза: ПГАСА, 2003. Ч. 2. С. 63–66.

Kiseleva O.A., Yartsev V.P. The Influence of Density on the Thermal Expansion of Wood-Based Panels. *Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva*: Collected Papers. Penza, Penza State Academy of Architecture and Civil Engineering Publ., 2003, part 2, pp. 63–66. (In Russ.).

11. Эриньш П.П. Строение и свойства древесины как многокомпонентной полимерной системы // Химия древесины. 1977. № 1. С. 8–25.

Erin'sh P.P. The Structure and Properties of Wood as a Multicomponent Polymer System. *Khimiya drevesiny*, 1977, no. 1, pp. 8–25. (In Russ.).

12. Эриньш П.П., Алксне И.М. Проникновение мономера в клеточные стенки древесины // Химия древесины. 1970. Вып. 6. С. 9–17.

Erin'sh P.P., Alksne I.M. Monomer Penetration into Wood Cell Walls. *Khimiya drevesiny*, 1970, iss. 6, pp. 9–17. (In Russ.).

13. Alemdar A., Sain M. Biocomposites from Wheat Straw Nanofibers: Morphology, Thermal and Mechanical Properties. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, iss. 2, pp. 557–565. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.05.044>

14. Badel E., Delisee C., Lux J. 3D Structural Characterisation, Deformation Measurements and Assessment of Low-Density Wood Fibreboard under Compression: The Use of X-Ray Microtomography. *Composites Science and Technology*, 2008, vol. 68, iss. 7–8, pp. 1654–1663. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.02.013>
15. Cervin N.T., Andersson L., Ng J.B.S., Olin P., Bergström L., Wågberg L. Lightweight and Strong Cellulose Materials Made from Aqueous Foams Stabilized by Nanofibrillated Cellulose. *Biomacromolecules*, 2013, vol. 14, iss. 2, pp. 503–511. <https://doi.org/10.1021/bm301755u>
16. Hendershot O.P. Thermal Expansion of Wood. *Science*, 1924, vol. 60, iss. 1559, pp. 456–457. <https://doi.org/10.1126/science.60.1559.456>
17. Hidaka H., Kim U.-J., Wada M. Synchrotron X-Ray Fiber Diffraction Study on the Thermal Expansion Behavior of Cellulose Crystals in Tension Wood of Japanese Poplar in the Low-Temperature Region. *Holzforschung*, 2010, vol. 64, iss. 2, pp. 167–171. <https://doi.org/10.1515/hf.2010.028>
18. Hori R., Wada M. The Thermal Expansion of Wood Cellulose Crystals. *Cellulose*, 2005, vol. 12, pp. 479–484. <https://doi.org/10.1007/s10570-005-5967-5>
19. Ramiah M.V., Goring D.A.I. The Thermal Expansion of Cellulose, Hemicellulose, and Lignin. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 1965, vol. 11, iss. 1, pp. 27–48. <https://doi.org/10.1002/polc.5070110105>
20. Villari E.M. Sur le Propriétés Physiques du Bois Conpé Parallèlement ou Transversalement aux Fibres. *Annales de Chimie et de Physique*, 1868, vol. 14, pp. 503–504. (In French).

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



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 676.154.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-152-165

Влияние вида ножевой размалывающей гарнитуры на процесс получения микрокристаллической целлюлозы

Л.В. Юртаева[✉], канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [ITU-6565-2023](https://orcid.org/0009-0002-6045-3442),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6045-3442>

Ю.Д. Алашкевич, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [ITU-6674-2023](https://orcid.org/0009-0005-9894-2630),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9894-2630>

Е.А. Слизикова, аспирант; ResearcherID: [ITU-6598-2023](https://orcid.org/0009-0003-2708-0653),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2708-0653>

Е.В. Каплёв, аспирант; ResearcherID: [ITU-6526-2023](https://orcid.org/0009-0005-0235-7630),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>

С.А. Пожаркова, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [IUQ-1617-2023](https://orcid.org/0009-0000-6403-1701),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6403-1701>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660037; 2052727@mail.ru[✉], alashkevichud@sibsau.ru, 905426521lena@mail.ru, kaplyov2017@mail.ru, pzh02@mail.ru

Поступила в редакцию 06.07.23 / Одобрена после рецензирования 04.10.23 / Принята к печати 07.10.23

Аннотация. Показана возможность интенсификации процесса получения микрокристаллической целлюлозы с использованием предварительного размола волокнистых полуфабрикатов перед гидролизом. Рассмотрены технологические факторы, определяющие размол волокнистых материалов. На эффективность процесса получения микрокристаллической целлюлозы влияет выбор технологии ее производства. Для размола использовалась полупромышленная дисковая мельница с размалывающей гарнитурой с прямолинейной и криволинейной формами ножей. Построены мультифизические модели течения волокнистой массы в зоне размола дисковой мельницы при разных рисунках размалывающих ножевых гарнитур. Морфологические свойства волокна измерены на автоматическом анализаторе волокна Morfi Neo после размола до 65 °ШР. Проанализирован характер изменения свойств беленой сульфатной листовенной и хвойной целлюлозы. Выяснено, что он идентичен для всех степеней помола, но в наибольшей степени количественные характеристики изменяются при размолу хвойной целлюлозы с использованием прямолинейной гарнитуры: средневзвешенная длина волокон уменьшается на 17 %, ширина – на 14 %; содержание обломанных волокон увеличивается на 22 %, мелочи по длине – на 67 %, индекс фибрилляции – в 1,9 раза. Проведен сравнительный анализ значений степени полимеризации в зависимости от рисунка размалывающих ножевых гарнитур. Определены условия получения микрокристаллической целлюлозы после размола волокнистой массы в полупромышленной дисковой мель-

нице в зависимости от степени помола. Показано, что с повышением степени помола волокнистой массы с 15 до 65 °ШР степень полимеризации микрокристаллической целлюлозы снижается с 272 до 120, концентрация соляной кислоты – с 2,5 до 1,5 н., продолжительность гидролиза – со 120 до 90 мин. Разработанный метод получения микрокристаллической целлюлозы позволяет сократить расходы на химическую обработку волокнистой массы (концентрацию кислоты, продолжительность обработки и температуру гидролиза) в 1,5 раза.

Ключевые слова: размол волокнистых материалов, микрокристаллическая целлюлоза, размалывающая гарнитура, гидролиз, фибрилляция, дисковая мельница, деструкция, степень полимеризации

Для цитирования: Юртаева Л.В., Алашкевич Ю.Д., Слизикова Е.А., Каплёв Е.В., Пожаркова С.А. Влияние вида ножевой размалывающей гарнитуры на процесс получения микрокристаллической целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 152–165. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-152-165>

Original article

The Effect of the Knife Tacking Type on the Process of Producing Microcrystalline Cellulose

Larisa V. Yurtayeva[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [ITU-6565-2023](https://orcid.org/0009-0002-6045-3442), ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6045-3442>

Yuriy D. Alashkevich, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ITU-6674-2023](https://orcid.org/0009-0005-9894-2630),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9894-2630>

Elena A. Slizikova, Postgraduate Student; ResearcherID: [ITU-6598-2023](https://orcid.org/0009-0003-2708-0653),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2708-0653>

Evgeniy V. Kaplyov, Postgraduate Student; ResearcherID: [ITU-6526-2023](https://orcid.org/0009-0005-0235-7630),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0235-7630>

Snezhana A. Pozharkova, Junior Research Scientist;

ResearcherID: [IUQ-1617-2023](https://orcid.org/0009-0000-6403-1701), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6403-1701>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. imeny gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; 2052727@mail.ru[✉], alashkevichud@sibsau.ru, 905426521lena@mail.ru, kaplyov2017@mail.ru, pzh02@mail.ru

Received on July 6, 2023 / Approved after reviewing on October 4, 2023 / Accepted on October 7, 2023

Abstract. The article shows the possibility of intensifying the process of producing microcrystalline cellulose via pregrinding of fibrous semi-finished products before hydrolysis. The technological factors determining the grinding of fibrous materials have been considered. The efficiency of the microcrystalline cellulose production process is influenced by the choice of its production technology. For grinding, a semi-industrial disc mill with a tacking with rectilinear and curvilinear knives has been used. Multiphysics models of the flow of fibrous mass in the grinding zone of a disc mill with different knife tacking patterns have been constructed. The morphological properties of the fiber have been measured on the Morfi Neo automatic fiber analyzer after grinding to 65 °SR. The nature of the change in the properties of bleached sulfate hardwood and softwood cellulose has been analyzed. It has been found that it is identical for all degrees of grinding, but the quantitative characteristics change to the greatest extent when grinding softwood cellulose using a tacking with rectilinear knives:

the weighted average length of fibers decreases by 17 %, the width – by 14 %; the content of broken fibers increases by 22 %, the content of fines along the length – by 67 % and the fibrillation index – by 1.9 times. A comparative analysis of the values of the degree of polymerization depending on the knife tacking pattern has been carried out. The conditions for producing microcrystalline cellulose after grinding the fibrous mass in a semi-industrial disc mill, depending on the degree of grinding, have been determined. It has been shown that with an increase in the degree of grinding of the fibrous mass from 15 to 65 °SR, the degree of polymerization of microcrystalline cellulose decreases from 272 to 120, the concentration of hydrochloric acid – from 2.5 to 1.5 N and the duration of hydrolysis – from 120 to 90 min. The developed method for producing microcrystalline cellulose makes it possible to reduce the cost of chemical treatment of the fibrous mass (acid concentration, treatment duration and hydrolysis temperature) by 1.5 times.

Keywords: grinding of fibrous materials, microcrystalline cellulose, tacking, hydrolysis, fibrillation, disc mill, destruction, degree of polymerization

For citation: Yurtayeva L.V., Alashkevich Yu.D., Slizikova E.A., Kaplyov E.V., Pozharkova S.A. The Effect of the Knife Tacking Type on the Process of Producing Microcrystalline Cellulose. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 152–165. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-152-165>

Введение

Целлюлоза – самый распространенный в природе полимер, содержащийся в волокнах деревьев, однолетних растений, в отходах сельскохозяйственных культур и другой биомассе. Волокна, которые содержат целлюлозу, могут быть расщеплены на отдельные фибриллы – фибриллированную целлюлозу (различной длины и ширины) – до наноразмеров. Для устранения свойственных природной целлюлозе недостатков (низкой устойчивости к действию микроорганизмов (гниению), света, тепла, атмосферы) и придания новых ценных свойств ее модифицируют 2 методами: изменением надмолекулярной структуры (структурная модификация) и разнообразными химическими превращениями (химическая модификация) [19, 21]. Модификация целлюлозы в большинстве случаев позволяет получать материалы с улучшенными или заданными свойствами, что зависит от направления трансформации [23, 26, 27].

Внедрение модифицированной мелкодисперсной целлюлозы в различные отрасли промышленности будет способствовать снижению экономических затрат при производстве продуктов на биологической основе в сравнении с продуктами, полученными на основе нефти. Наноматериалы из растительных полимеров намного дешевле, чем из нефти, кроме того, их можно извлекать из различного вида сырья, тогда как залежи легкодобываемых нефтяных ресурсов практически истощены [24].

Независимо от отрасли, в которой ее используют, модифицированная мелкодисперсная целлюлоза (микросталлическая целлюлоза – МКЦ, микрофибриллярная целлюлоза) обладает свойствами, определяющими реакцию готовой продукции на различные воздействия. В ряде работ, связанных с получением МКЦ, основное внимание уделяется действию кислот на волокнистую массу [12, 13, 16, 20, 22, 25]. Анализ этих работ показал, что при производстве МКЦ с использованием неорганических кислот не всегда удается минимизировать концентрацию кислоты или выбрать оптимальный технологический режим. На наш

взгляд, снизить вредное воздействие неорганических кислот на окружающую среду и энергозатраты при получении МКЦ можно за счет обработки волокнистой массы перед размолом (безножевым или ножевым способом).

Основное назначение размола волокнистой массы для производства бумаги заключается в изменении свойств волокон (увеличение гибкости, эластичности, появление жирности на ощупь). Ряд технологических факторов, влияющих на эффективность размола волокнистых материалов, подробно рассмотрен исследователями [1, 6].

К главным характеристикам ножевой гарнитуры относятся: толщина ножей и ширина канавок между ними, угол наклона ножа к радиусу диска, наличие и расположение перегородок в канавках между ножами [8, 9]. Расстояние между ножами 0,65...0,8 мм будет способствовать слабой гидратации волокон; 0,5...0,6 мм – более сильной; 0,2...0,4 мм – слабому рубящему воздействию на волокно; 0,1...0,2 мм – среднему; зазор менее 0,1 мм – сильному воздействию [18]. Установлено, что средний угол наклона ножей к радиусу диска колеблется от 12,5 до 25° [31], а угол скрещивания ножей составляет 25...50°. При этом основной (механический) разمول волокнистого полуфабриката происходит на передней кромке ножа небольшой ширины, остальная часть ширины ножа играет второстепенную роль [4, 8]. Исходя из этого авторы указанных работ считают, что характер разработки волокна в первую очередь зависит от числа режущих кромок, а не от ширины размалывающих ножей. Для размола любого волокнистого материала ширина ножей должна быть не более 3...4 мм. В этом случае достигаются высокие бумагообразующие свойства целлюлозы при минимальной энергоемкости процесса.

При размоле целлюлоза для производства бумаги проходит следующие стадии обработки [3]: окончательное разделение пучков на отдельные волокна; разрушение поверхностей оболочки (первичной стенки) волокон; внешнее и внутреннее фибриллирование, что в дальнейшем способствует ускорению процесса набухания; выравнивание длины волокон.

На целлюлозно-бумажных предприятиях, при их большой производительности, разمول полуфабрикатов осуществляется в основном на дисковых мельницах [5]. Они являются универсальным размалывающим оборудованием, которое успешно используется для измельчения различных видов целлюлозы и полуцеллюлозы, отходов сортирования целлюлозы и древесной массы, включая и разمول сучков, щепы при производстве древесной массы, термомеханической массы и массы для древесноволокнистых плит, для рафинирования бумажной и макулатурной массы. Преимуществами данного вида оборудования служат компактность, удобство в эксплуатации и техническом обслуживании, возможность получения тонкодисперсных порошков при относительно малых энергозатратах, высокой степени механохимической активации продуктов помола.

На наш взгляд, способность размалывающего оборудования разделять различные растительные волокнистые полуфабрикаты на волокна, измельчать их и развивать у них определенные свойства можно использовать не только с целью получения длиноволокнистых фракций, но и мелкодисперсной целлюлозы гидrolитической деструкции (МКЦ) [1, 7, 11, 17].

Принимая во внимание, что модифицированная целлюлоза представляет собой предмет активного изучения [28] и применение данного вида сырья важ-

но для химической, нефтехимической, медицинской, фармацевтической промышленности, т. к. открывает перспективу получения материалов с качественно и количественно новыми характеристиками, исследования влияния размола волокнистой массы на процесс получения модифицированной целлюлозы являются актуальными.

Цель работы – изучение влияния рисунка размалывающей гарнитуры полупромышленной дисковой мельницы на процесс получения МКЦ.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – процесс получения МКЦ. В качестве сырья использованы беленая сульфатная хвойная целлюлоза (БСХЦ) и беленая сульфатная лиственная целлюлоза (БСЛЦ) – полуфабрикаты РОП ОАО «Группа Илим» (г. Братск).

Одной из проблем при получении мелкодисперсных целлюлозных материалов химическим способом является утилизация отработанного раствора кислоты после гидролиза [29, 30]. Для снижения вредного воздействия неорганических кислот на окружающую среду и энергозатрат при получении МКЦ волокнистая масса подвергалась размолу.

Для анализа движения потока волокнистой массы в дисковой мельнице с размалывающими гарнитурами, имеющими разную форму ножей, были построены мультифизические модели (рис. 1). Компьютерное моделирование проходило в несколько стадий: создание твердотельной 3D-модели; формирование расчетной сетки (рис. 1, а); задание граничных условий (рис. 1, б); моделирование потока внутри мельницы; анализ полученных результатов. Количество элементов сетки – 257 320; входные данные: давление на входе – 500 кПа, частота вращения ротора – 2000 об./мин.

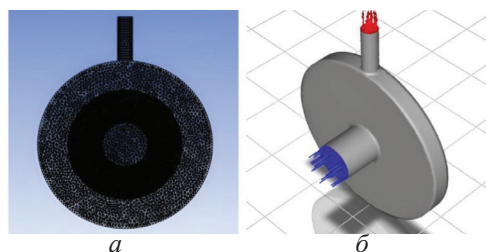


Рис. 1. Мультифизические модели дисковой мельницы: а – расчетная сетка; б – граничные условия (вход и выход)

Fig. 1. The multiphysics models of a disc mill: а – computational grid; б – boundary conditions (inlet and outlet)

Модель построена на основании решения уравнений Рейнольдса для моделирования течений внутри дисковой мельницы с учетом ее реальной геометрии. В общем случае рассматривали турбулентное течение. Для моделирования турбулентного течения в качестве основной использовали 2-зонную 2-параметрическую модель Ментера SST, т. к. модели типа $k-\varepsilon$ лучше описывают свойства свободных сдвиговых течений; модели $k-\omega$ имеют преимущество при моделировании пристеночных течений и записывается путем суперпозиции моделей $k-\varepsilon$ и $k-\omega$. Суть этого подхода заключается в решении осредненных уравнений Навье–Стокса:

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla(\rho V \cdot V) = -\nabla p + \nabla(\tau - \overline{\rho V' \cdot V'} + F),$$

где V – усредненное по времени поле скоростей; ρ – плотность моделируемой жидкости, кг/м³; t – время, с; p – давление, Па; τ – кинетическая энергия турбулентности, Дж/м³; $-\rho V' \cdot V'$ – тензор рейнольдсовых напряжений; F – площадь контакта ножей, м².

При построении 2-параметрических моделей турбулентности для определения компонента тензора рейнольдсовых напряжений применяли гипотезу Буссинеска об изотропной турбулентной вязкости:

$$-\rho V' \cdot V' = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij},$$

где μ_t – турбулентная вязкость; u_i, u_j – компоненты векторов скорости в i -й и j -й координатных осях соответственно, м/с; x – пространственные координаты, м; k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций.

Плавный переход от модели k - ω в пристеночной области к модели k - ϵ вдали от твердых стенок обеспечивали введением весовой эмпирической функции F_1 .

Размол волокнистой массы проводили в лабораторных условиях на полупромышленной дисковой мельнице после роспуска в гидроразбивателе при концентрации 10 кг/м³ [20]. Пробы отбирали каждые 10 мин размола до степени помола 65 °ШР. Степень помола измеряли в соответствии с ISO 5267-1.

Схемы ножевых размалывающих гарнитур: традиционной 8-секторной с прямолинейной формой ножей с углом 22,5° [15] и с криволинейными ножами серповидной формы [14] – представлены на рис. 2, их конструктивные и технологические характеристики – в табл. 1.

Рис. 2. Схемы ножевых размалывающих гарнитур: *a* – с прямолинейной формой ножей; *b* – с криволинейными ножами серповидной формы

Fig. 2. The schemes of the knife tackings: *a* – with rectilinear knives; *b* – with curvilinear crescent-shaped knives

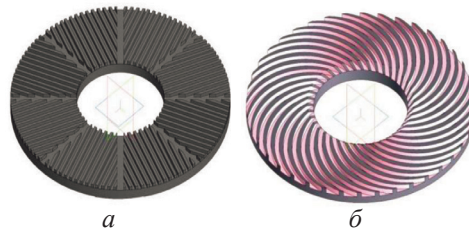


Таблица 1

Конструктивные и технологические характеристики ножевых размалывающих гарнитур

The design and technological characteristics of the knife tackings

Форма ножей	Наружный / внутренний диаметр, мм	Размер ножей, мм		Ширина канавки, мм	Секундная режущая длина, м/с	Площадь контакта ножей ротора и статора, м ²	Отношение площади поверхности ножей к общей площади поверхности гарнитуры, %
		толщина	высота				
Прямолинейная	300/120	4	4	4	23070	0,0198	45
Криволинейная		6	5	6	7200	0,0119	41

Морфологические свойства волокна при различной степени помола исследованы на оптическом анализаторе волокна Morfi Neo. После размолла целлюлозу сухостью 93...98 % подвергали гетерогенному гидролизу при атмосферном давлении с использованием 1,5–2,5 н. соляной кислоты с целью деструкции волокнистой структуры целлюлозы. Регулируемыми параметрами гидролиза являлись степень помола (интервал варьирования – 15...65 °ШР), температура (80...100 °С), продолжительность (90...120 мин) и концентрация кислоты (1,5...2,5 н.). Гидромодуль оставался постоянным – 15:1.

Далее выполнен механический размол гидролизованной целлюлозы на мельнице до мелкодисперсного состояния. Для определения степени полимеризации МКЦ по ГОСТ 9105–74 применяли комплексное соединение гексанатрий тристаратр трат железа [10]. Индекс кристалличности МКЦ установлен на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3. Излучение CuK α – сканированием: 1 °/мин, шаг сканирования – 0,02°. Ситовой анализ осуществляли по ГОСТ 3584–73.

Результаты исследования и их обсуждение

Распределение движения потока волокнистой массы. Как видно из рис. 3, скорости движения волокнистой массы на гарнитурах независимо от формы ножей достигают наиболее высоких значений по периферии ножевых размалывающих гарнитур. При этом ширина зоны низкой скорости движения потока у прямолинейной 8-секторной гарнитуры немного больше и составила 1/3 от общего диаметра гарнитуры, тогда как у криволинейной – 1/4.

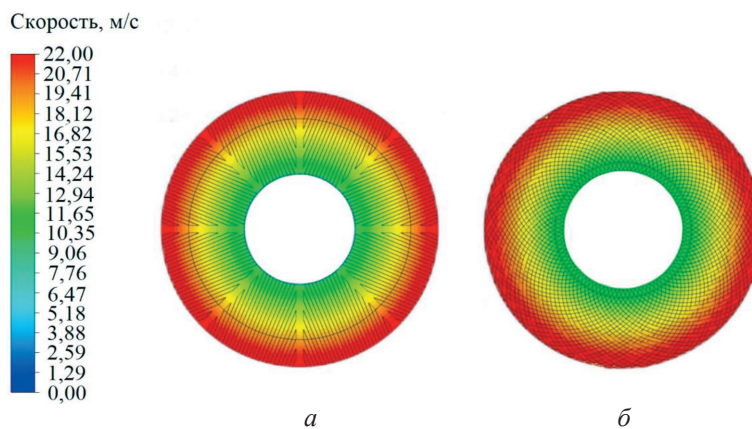


Рис. 3. Мультифизическая модель распределения угловой скорости движения волокнистой массы: *a* – прямолинейная гарнитура; *б* – криволинейная гарнитура

Fig. 3. The multiphysics model of the distribution of angular velocity of the fibrous mass movement: *a* – a tacking with rectilinear knives; *б* – a tacking with curvilinear knives

Из рис. 4, *a* видно, что ширина сектора минимального давления на ножевой прямолинейной гарнитуре больше, чем на криволинейной гарнитуре, примерно в 3 раза.

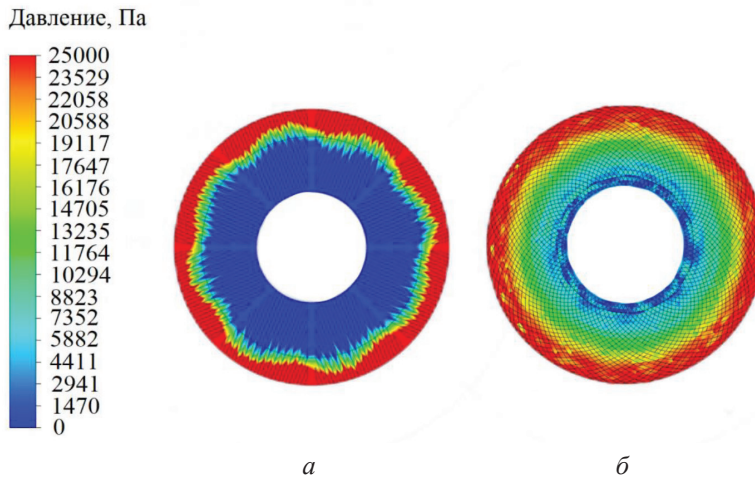


Рис. 4. Мультифизическая модель распределения давления движения волокнистой массы: *a* – прямолинейная гарнитура; *б* – криволинейная гарнитура

Fig. 4. The multiphysics model of the distribution of pressure of the fibrous mass movement: *a* – a tacking with rectilinear knives; *б* – a tacking with curvilinear knives

Технологические параметры дисковой мельницы. Расчет технологических параметров дисковой мельницы включал определение секундной режущей длины по конкретному рисунку гарнитуры (м/с), площади контакта ножей, секундной размалывающей способности ($\text{м}^2/\text{с}$) [2, 3]. Установлены секундная режущая длина 23 070 и 7200 м/с для прямолинейной и криволинейной гарнитур соответственно, секундная размалывающая способность 0,66 и 0,397 $\text{м}^2/\text{с}$ соответственно и площадь контакта ножей ротора и статора 0,0198 и 0,0119 м^2 соответственно. Исходя из этих значений, благодаря криволинейной форме ножей снизятся усилия, действующие на волокно по касательной, т. е. будет преобладать фибриллирование при значительных энергозатратах, в то время как использование прямолинейной гарнитуры позволит достичь оптимальных соотношений как рубящего, так и фибриллирующего эффектов, что является наилучшим вариантом для получения МКЦ.

Количественные данные о морфологических свойствах БСХЦ и БСЛЦ, полученные после размола, представлены в табл. 2. Как показывают данные таблицы, независимо от способа обработки волокнистой массы изменения морфологических свойств волокна имеют одинаковую тенденцию при различном рисунке ножевой размалывающей гарнитуры. Причем после механической обработки волокнистой массы средневзвешенная длина и содержание обломанных волокон уменьшаются, а доля мелочи увеличивается для обоих видов сырья.

Таблица 2

**Морфологические свойства волокон БСХЦ и БСЛЦ
при различных ножевых размалывающих гарнитурах и степени помола**
**The morphological properties of the bleached sulfate softwood and hardwood cellulose
fibers at different knife tacking types and degrees of grinding**

Форма ножей	Степень помола, °ШР	Размер волокон, мкм		Содержание, %		Индекс фибрилляции
		средне-взвешенная длина	ширина	обломанных волокон	коротких волокон	
<i>БСЛЦ</i>						
—*	15	965	20,5	20,3	20,7	0,91
Прямолинейная	65	851	21,0	22,9	58,4	1,15
Криволинейная	65	894	20,8	21,7	32,6	1,25
<i>БСХЦ</i>						
—*	15	2184	27,4	35,2	27,7	0,84
Прямолинейная	65	1596	28,1	41,2	53,4	1,62
Криволинейная	65	1807	27,7	40,1	43,3	2,56

* До помола.

Таким образом, с увеличением степени помола сравниваемых волокнистых полуфабрикатов наибольший фибриллирующий эффект выявлен при использовании гарнитуры с криволинейной формой ножей. Средневзвешенная длина волокон ниже у волокнистой массы, прошедшей обработку с применением гарнитуры с прямолинейной формой ножей, в результате более неравномерного распределения давления в зоне помола. Ширина волокон БСХЦ выше по сравнению с БСЛЦ за счет большего сплющивания и набухания в среднем на 35 %. Содержание мелочи по длине для гарнитуры с прямолинейной формой ножей в сравнении с криволинейной в среднем увеличилось на 7 %.

Так как после помола содержание мелочи по длине выше у волокнистого полуфабриката из хвойной целлюлозы, дальнейшие исследования по получению МКЦ проводили с использованием данного вида сырья. Образцы БСХЦ со степенью помола 15, 28, 50 и 65 °ШР подвергали обработке соляной кислотой с целью удаления аморфной части и получения МКЦ.

Анализ результативных данных показал, что у образцов со степенью помола 65 °ШР в сравнении с образцами, имеющими степень помола 15 °ШР, продолжительность гидролиза снижается со 120 до 90 мин; температура проведения химической обработки – со 100 до 80 °С; концентрация кислоты – с 2,5 до 1,5 н. Снижение происходит за счет предварительного разрушения при помоле клеточной стенки волокна, расщепления ее на фибриллы, повышения мягкости и набухающей способности волокон, что положительно сказывается на проникновении кислоты в структуру волокна при гидролизе. Кроме того, разрыв гликозидных связей в цепных макромолекулах целлюлозы во время кислотной обработки приводит к уменьшению степени полимеризации, удалению аморфной части целлюлозы и образованию МКЦ. Таким образом, наиболее эффективные условия получения МКЦ: степень помола – 65 °ШР, концентрация кислоты – 1,5 н., продолжительность гидролиза – 90 мин, температура – 80 °С (табл. 3, 4).

Таблица 3

Качественные показатели образцов МКЦ при разных ножевых размалывающих гарнитурах и технологических параметрах гидролиза
The qualitative indicators of the microcrystalline cellulose samples at different knife tacking types and technological parameters of hydrolysis

Вариант эксперимента	Технологические параметры гидролиза					Показатели образцов МКЦ					
	концентрация кислоты, н.	степень размола, °ШР	продолжительность, мин	температура, °С	степень полимеризации	индекс кристалличности	выход, %	белизна, %	насыпная плотность, г/мл		
—*	2,5	15	120	100	272	0,70	92,6	84,0	0,294		
Прямойлинейная форма ножей	2,0	28	110	95	190	0,72	93,2	85,0	0,301		
	1,6	50	100	90	158	0,72	94,6	86,0	0,305		
Криволинейная форма ножей	1,5	65	90	80	120	0,75	97,0	90,0	0,308		
	1,5	65	90	80	170	0,75	97,0	86,0	0,301		
Традиционный способ размола	Avicel стандарт FAO UN MCC 460 i				265	0,63...0,82	—	90,0	0,280...0,360		

* До размола.

Таблица 4

Влияние рисунка ножевых размалывающих гарнитур на размерность и потерю МКЦ
The effect of the knife tacking pattern on the dimension and loss of microcrystalline cellulose

Форма ножей	Концентрация кислоты, н.	Потеря сырья, %	Средний размер частиц, мкм	
			длина	ширина
Прямойлинейная	1,5	3,0	48	15
		2,9	76	21

Выводы

1. С увеличением степени помола независимо от вида размалывающей гарнитуры степень полимеризации микрокристаллической целлюлозы снижается.

2. В результате кислотного гидролиза наименьшие степень полимеризации и средний размер частиц микрокристаллической целлюлозы достигнуты при предварительном размоле волокнистой массы с использованием прямолинейной 8-секторной гарнитуры с углом наклона ножей $22,5^\circ$.

3. Применение целлюлозы, предварительно обработанной на ножевой размалывающей установке, позволяет сократить расходы на дальнейшую химическую обработку (концентрацию кислоты, продолжительность обработки и температуру проведения гидролиза) при получении микрокристаллической целлюлозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1980. 334 с.

Alashkevich Yu.D. *Fundamentals of the Theory of Hydrodynamic Processing of Fibrous Materials in Grinding Machines*: Doc. Techn. Sci. Diss. Leningrad, 1980. 334 p. (In Russ.).

2. Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С. Теория и проектирование машин и оборудования в промышленности. Ч. 1. Красноярск: СибГТУ, 2013. 197 с.

Alashkevich Yu.D., Reshetova N.S. *Theory and Design of Machinery and Equipment in the Industry*. Part 1. Krasnoyarsk, SibSTU Publ., 2013. 197 p. (In Russ.).

3. Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С., Марченко Р.А. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли: практикум / СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2020. 96 с.

Alashkevich Yu.D., Reshetova N.S., Marchenko R.A. *Theory and Design of Machinery and Equipment of the Branch: Practicum*. Krasnoyarsk, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology Publ., 2020. 96 p. (In Russ.).

4. Гаузе А.А., Гончаров В.Н. Машины для размола и сортирования бумажной массы: конспект лекций. Л., 1975. 115 с.

Gause A.A., Goncharov V.N. *Machines for Grinding and Sorting Paper Pulp*: Lecture Notes. Leningrad, 1975. 115 p. (In Russ.).

5. Дятлов Е.С., Рублев А.И., Кондрашов А.И., Литвинов А.Б. Дисковые мельницы отечественного производства для целлюлозно-бумажной промышленности // Целлюлоз.-бум. машиностроение. 1974. № 1. С. 1–5.

Dyatlov E.S., Rublev A.I., Kondrashov A.I., Litvinov A.B. Disc Mills of Domestic Production for Pulp and Paper Industry. *Tsellyulozno-bumazhnoe mashinostroenie*, 1974, no. 1, pp. 1–5. (In Russ.).

6. Иванов С.Н. Технология бумаги. 3-е изд. М.: Шк. бумаги, 2006. 696 с.

Ivanov S.N. *Paper Technology*. 3rd ed. Moscow, Shkola Bumagi Publ., 2006. 696 p. (In Russ.).

7. Каплёв Е.В., Юртаева Л.В., Алашкевич Ю.Д., Таразеев Д.С. Исследование механических прочностных свойств целлюлозы, полученной из биоповрежденной древесины // Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и экологической безопасности: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с участием молодых ученых, Санкт-Петербург, 7–8 апр. 2022 г. СПб.: СПбГУПТД, 2022. С. 25–28.

Kaplyov E.V., Yurtayeva L.V., Alashkevich Yu.D., Tarazeev D.S. Investigation of Mechanical Strength Properties of Cellulose Obtained from Bio-Damaged Wood. *Modern Trends in the Development of Chemical Technology, Industrial Ecology and Environmental Safety: Materials of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference with the Participation of Young Scientists* (St. Petersburg, April 7–8, 2022). St. Petersburg, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design Publ., 2022, pp. 25–28. (In Russ.).

8. Легоцкий С.С., Гончаров В.Н. Размалывающее оборудование и подготовка бумажной массы. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 222 с.

Legotskiy S.S., Goncharov V.N. *Grinding Equipment and Preparation of Paper Pulp*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 222 p. (In Russ.).

9. Легоцкий С.С., Лантнев Л.Н. Размол бумажной массы. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 93 с.

Legotskiy S.S., Laptev L.N. *Paper Pulp Grinding*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981. 93 p. (In Russ.).

10. Оболенская А.В., Щеголев В.П., Аким Г.Л., Аким Э.Л., Коссович Н.Л., Емельянова И.З. Практические работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 411 с.

Obolenskaya A.V., Shchegolev V.P., Akim G.L., Akim E.L., Kossovich N.L., Emelyanova I.Z. *Practical Work on the Chemistry of Wood and Pulp*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 411 p. (In Russ.).

11. Патент 2147057 РФ, МПК D21C 9/00, C08B 1/02. Способ получения микрокристаллической целлюлозы: № 99117051: заявл. 04.08.1999: опубл. 27.03.2000 / А.П. Карманов, Л.С. Кочева, А.А. Киселева.

Karmanov A.P., Kocheva L.S., Kiseleva A.A. *Method for Producing Microcrystalline Cellulose*. Patent RF, no. RU 2147057 C1, 2000. (In Russ.).

12. Патент 2155192 РФ, МПК C08B 15/02. Способ получения микрокристаллической целлюлозы: № 99116394: заявл. 04.08.1999: опубл. 27.08.2000 / А.В. Тихомиров, Р.А. Буланов.

Tikhomirov A.V., Bulanov R.A. *Method for Producing Microcrystalline Cellulose*. Patent RF, no. RU 2155192 C1, 2000. (In Russ.).

13. Патент 2178033 РФ, МПК D21C 1/04, C08B 15/00. Способ получения микрокристаллической целлюлозы из соломы злаковых: № 2006126226: заявл. 19.07.2006: опубл. 10.12.2007 / Б.Н. Кузнецов, В.Г. Данилов, О.В. Яценкова, Е.Ф. Ибрагимова.

Kuznetsov B.N., Danilov V.G., Yatsenkova O.V., Ibragimova E.F. *Method for Producing Microcrystalline Cellulose from Cereal Straw*. Patent RF, no. RU 2178033 C1, 2007. (In Russ.).

14. Патент 2307833 РФ, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура: № 2006110647: заявл. 03.04.2007: опубл. 10.10.2007 / Ю.Д. Алашкевич, В.И. Ковалев, В.Ф. Харин, А.П. Мухачев.

Alashkevich Yu.D., Kovalev V.I., Kharin V.F., Mukhachev A.P. *Tacking*. Patent RF, no. RU 2307833 C1, 2007. (In Russ.).

15. Патент 2314381 РФ, МПК D21D 1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура для дисковой мельницы: № 2006121711: заявл. 19.06.2006: опубл. 10.01.2008 / Ю.Д. Алашкевич, В.И. Ковалев, А.А. Набиева.

Alashkevich Yu.D., Kovalev V.I., Nabieva A.A. *Tacking for a Disc Mill*. Patent RF, no. RU 2314381 C1, 2008. (In Russ.).

16. Патент 2395636 РФ, МПК D21B 1/36, D21C 1/04, C08B 1/00, C08B 15/02. Способ получения микрокристаллической целлюлозы из автогидролизованной древесины: № 2009126875: заявл. 13.07.2009: опубл. 27.07.2010 / Б.Н. Кузнецов, В.Г. Данилов, О.В. Яценкова, Е.Ф. Ибрагимова.

Kuznetsov B.N., Danilov V.G., Yatsenkova O.V., Ibragimova E.F. *Method for Producing Microcrystalline Cellulose from Autohydrolyzed Wood*. Patent RF, no. RU 2395636 C1, 2010. (In Russ.).

17. Патент 2797202 РФ, МПК D21C 1/04, C08B 15/00. Способ получения микрокристаллической целлюлозы: № 2022132617: заявл. 13.12.2022: опубл. 31.05.2023 / Ю.Д. Алашкевич, В.И. Ковалев, Л.В. Юртаева, Е.В. Каплёв, Р.А. Марченко.

Alashkevich Yu.D., Kovalev V.I., Yurtayeva L.V., Kaplyov E.V., Marchenko R.A. *Method for Producing Microcrystalline Cellulose*. Patent RF, no. 2797202 C1, 2023. (In Russ.).

18. Симигин П.С. О размоле и размалывающем оборудовании // Бум. пром-сть. 1970. № 6. С. 15–17.

Simigin P.S. On Grinding and Grinding Equipment. *Bumazhnaya promyshlennost'*, 1970, no. 6, pp. 15–17. (In Russ.).

19. Юртаева Л.В., Алашкевич Ю.Д. Способ получения микрокристаллической целлюлозы на основе биоповрежденной древесины // Хвойные бореал. зоны. 2022. Т. XL, № 2. С. 158–163.

Yurtayeva L.V., Alashkevich Yu.D. A Method for Producing Microcrystalline Cellulose Based on Bio-Damaged Wood. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2022, vol. XL, no. 2, pp. 158–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2022-2-158-163>

20. Юртаева Л.В., Алашкевич Ю.Д., Каплёв Е.В., Слизикова Е.А. Влияние размола однолетних растительных полимеров на процесс получения мелкодисперсной целлюлозы // Хвойные бореал. зоны. 2023. Т. XLI, № 4. С. 361–368.

Yurtayeva L.V., Alashkevich Yu.D., Kaplev E.V., Slizikova E.A. The Effect of Grinding Annual Plant Polymers on the Process of Obtaining Fine Cellulose. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2023, vol. XLI, no. 4, pp. 361–368. (In Russ.). <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2023-4-361-368>

21. García Hernández M.A., Marure A.L., Neira Velázquez M.G., Mariano Torres J.A., Galvan A.A. Microcrystalline Cellulose Isolation – Proposed Mechanism: Enhanced Coupling. *BioResources*, 2023, vol. 18, iss. 1, pp. 1788–1802. <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.1788-1802>

22. Hermawan D., Lai T.K., Jafarzadeh S.J., Gopakumar D.A., Hasan M., Owolabi F.A.T., Sri Aprilia N.A., Rizal S., Abdul Khalil H.P.S. Development of Seaweed-Based Bamboo Microcrystalline Cellulose Films Intended for Sustainable Food Packaging Applications. *BioResources*, 2019, vol. 14, iss. 2, pp. 3389–3410. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3389-3410>

23. Hou W., Ling C., Shi S., Yan Z. Preparation and Characterization of Microcrystalline Cellulose from Waste Cotton Fabrics by Using Phosphotungstic Acid. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, vol. 123, pp. 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.112>

24. Piyas R.A., Sapuan S.M., Ishak M.R., Zainudin E.S., Atikah M.S. Characterization of Sugar Palm Nanocellulose and its Potential for Reinforcement with a Starch-Based Composite. *Sugar Palm Biofibers, Biopolymers, and Biocomposites*. 1st ed. Boca Raton, CRC Press, 2018, chapt. 10. <https://doi.org/10.1201/9780429443923-10>

25. Kale R.D., Bansal P.S., Gorade V.G. Extraction of Microcrystalline Cellulose from Cotton Sliver and its Comparison with Commercial Microcrystalline Cellulose. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, vol. 26, pp. 355–364. <https://doi.org/10.1007/S10924-017-0936-2>

26. Kushnir E.Yu., Autlov S.A., Bazarnova N.G. Preparation of Microcrystalline Cellulose Directly from Wood under Microwave Radiation. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 2015, vol. 41, pp. 713–718. <https://doi.org/10.1134/S1068162015070079>

27. Li T., Chen C., Brozena A.H., Hu L., Zhu J.Y., Xu L., Driemeier C., Dai J., Rojas O.J., Isogai A., Wågberg L., Hu L. Developing Fibrillated Cellulose as a Sustainable Technological Material. *Nature*, 2021, vol. 590, pp. 47–56. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03167-7>
28. *Microcrystalline Cellulose (MCC) Market by Source Type and Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast 2018 – 2025*. Portland, Allied Market Research, 2018. 212 p.
29. Queiroz A.L.P., Kerins B.M., Yadav J., Farag F., Faisal W., Crowley M.E., Lawrence S.E., Moynihan H.A., Healy A.-M., Vucen S., Crean A.M. Investigating Microcrystalline Cellulose Crystallinity using Raman Spectroscopy. *Cellulose*, 2021, vol. 28, pp. 8971–8985. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04093-1>
30. Tan W.Y., Gopinath S.C.B., Anbu P., Velusamy P., Gunny A.A.N., Chen Y., Subramaniam S. Generation of Microcrystalline Cellulose from Cotton Waste and its Properties. *BioResources*, 2023, vol. 18, iss. 3, pp. 4884–4896. <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.4884-4896>
31. Vasilyeva D.Yu., Yurtaeva L.V., Marchenko R.A., Kaplyov E.V., Zyryanov D.E., Reshetova N.S. Investigation of the Influence of the Pattern of a Disc Mill Set on the Process of Obtaining Powdered Pulp. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Krasnoyarsk, vol. 2094, art. no. 042050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2094/4/042050>

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

Научная статья

УДК 663.15

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-166-177

Перспективы глубокой переработки бумажного шлама с применением ферментов, микроводорослей и дрожжей

Д.В. Тарабукин[✉], канд. биол. наук; ResearcherID: P-9578-2015,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8572-4902>

Е.Н. Патова, канд. биол. наук; ResearcherID: O-1154-2015,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9418-1601>

И.В. Новаковская, канд. биол. наук; ResearcherID: P-9590-2015,


ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5056-9965>

Институт биологии Коми научного центра УрО РАН, ул. Коммунистическая, д. 28, г. Сыктывкар, Россия, 167982; dim1822@yandex.ru[✉], patova@ib.komisc.ru, novakovskaya@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 21.08.23 / Одобрена после рецензирования 23.11.23 / Принята к печати 25.11.23

Аннотация. Представлены сведения о валоризации отходов, которые образуются в процессе производства санитарно-гигиенической бумаги. Оценена возможность био-конверсии полисахаридной части бумажного шлама в простые сахара. Рассмотрены варианты обработки бумажного шлама перед ферментативным гидролизом для достижения максимального выхода моносахаридов. Выявлено, что предобработка кислотами является ключевой стадией перед биокаталитическим расщеплением полисахаридов отхода. Дополнительный выход продуктов ферментативного гидролиза после предобработки кислотами был получен за счет предварительной экстракции бумажного шлама спиртом или ацетоном. Установлено, что наиболее интенсивно ферментативный гидролиз легкодоступных фракций бумажного шлама проходит за первые 10–12 ч. Далее процесс замедляется, вероятно, ввиду действия оставшихся компонентов наполнителей, а также увеличения доли трудногидролизуемой полисахаридной части. Во всех вариантах доля абсолютно сухого непрогидролизованного остатка составила около 43 ± 2 % от сухого вещества бумажного шлама. Основными продуктами ферментативного гидролиза были глюкоза и ксилоза. Полученные сахара использованы для миксотрофного культивирования водорослей *Tetradesmus obliquus* и *Chlorella vulgaris*. Среда, приготовленная на гидролизате бумажного шлама, обеспечивала максимальный выход биомассы микроводорослей. Подобраны штаммы дрожжей для конверсии моносахаридов из бумажного шлама. В серии экспериментов по нестерильному выращиванию дрожжей наиболее продуктивными (в пределах $2,10 \pm 0,14$ г воздушно-сухой массы дрожжей/дм³ за 24 ч) оказались культуры *Candida utilis* PAL D и *Debaryomyces hansenii* SWING R. Степень конверсии сахаров гидролизата составила 70 ± 2 %. Большая часть из оставшихся (около 80 %) сахаров представлена ксилозой. Полная утилизация сахаров происходила на 2-е сутки при добавлении в среду дополнительного источника азота. С другой стороны, отработанная питательная среда после отделения дрожжей была пригодна для миксотрофного культивирования микроводорослей. Выявлено, что экономические затраты на предварительную обработку бумажного шлама азотной кислотой можно нивелировать, применив полученные соли в качестве источника азота для культивирования дрожжей. При этом выход биомассы дрожжей увеличивается почти в 2 раза.

© Тарабукин Д.В., Патова Е.Н., Новаковская И.В., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: ферментативный гидролиз, глубокая переработка отходов, микробная конверсия, микроводоросли, дрожжи, отходы бумажного производства, бумажный шлам
Благодарности: Работа выполнена в рамках госзаданий № 122040600019-1 и 122040600026-9.

Для цитирования: Тарабукин Д.В., Патова Е.Н., Новаковская И.В. Перспективы глубокой переработки бумажного шлама с применением ферментов, микроводорослей и дрожжей // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 166–177. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-166-177>

Original article

The Prospects for Advanced Processing of Paper Sludge Using Enzymes, Microalgae and Yeast

Dmytriy V. Tarabukin[✉], Candidate of Biology; ResearcherID: [P-9578-2015](https://orcid.org/0000-0001-8572-4902),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8572-4902>

Elena N. Patova, Candidate of Biology; ResearcherID: [O-1154-2015](https://orcid.org/0000-0002-9418-1601),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9418-1601>

Irina V. Novakovskaya, Candidate of Biology; ResearcherID: [P-9590-2015](https://orcid.org/0000-0001-5056-9965),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5056-9965>

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Kommunisticheskaya, 28, Syktyvkar, 167982, Russian Federation; dim1822@yandex.ru[✉], patova@ib.komisc.ru, novakovskaya@ib.komisc.ru

Received on August 21, 2023 / Approved after reviewing on November 23, 2023 / Accepted on November 25, 2023

Abstract. This article presents the information on the valorization of waste generated during the production of tissue paper. The possibility of bioconversion of the polysaccharide part of paper sludge into simple sugars has been evaluated. The options for processing the paper sludge before enzymic hydrolysis to achieve the maximum yield of monosaccharides have been considered. Pretreatment with acids has been found to be a key step before the biocatalytic cleavage of waste polysaccharides. An additional yield of enzymic hydrolysis products after pretreatment with acids has been obtained by pre-extraction of the paper sludge with spirit or acetone. It has been established that the most intense enzymic hydrolysis of readily available fractions of the paper sludge takes place in the first 10–12 hours. Further, the process slows down, probably due to the action of the remaining components of the fillers, as well as an increase in the proportion of the difficult-to-hydrolyze polysaccharide part. In all cases, the proportion of absolutely dry non-hydrolyzed residue has been about 43±2 % of the dry matter of the paper sludge. The main products of enzymic hydrolysis have been glucose and xylose. The resulting sugars have been used for mixotrophic cultivation of the *Tetrademus obliquus* and *Chlorella vulgaris* algae. Yeast strains have been selected for the conversion of monosaccharides from the paper sludge. In a series of experiments on non-sterile yeast cultivation, the *Candida utilis* PAL D and *Debaryomyces hansenii* SWING R cultures have turned out to be the most productive (within 2.10±0.14 g of air-dry yeast weight/dm³ per 24 hours). The degree of conversion of hydrolysate sugars has been 70±2 %. Most of the remaining sugars (about 80 %) have been represented by xylose. Complete utilization of the sugars has taken place on the 2nd day when having added an extra nitrogen source to the medium. On the other hand, the spent nutrient medium after yeast

separation has been suitable for mixotrophic cultivation of microalgae. It has been revealed that the economic costs of pre-treatment of the paper sludge with nitric acid can be leveled by using the resulting salts as a nitrogen source for cultivating yeast. In doing so, the yield of yeast biomass increases by almost 2 times.

Keywords: enzymic hydrolysis, advanced waste processing, microbial conversion, microalgae, yeast, paper production waste, paper sludge

Acknowledgements: The work was carried out as part of the state assignments no. 122040600019-1 and no. 122040600026-9.

For citation: Tarabukin D.V., Patova E.N., Novakovskaya I.V. The Prospects for Advanced Processing of Paper Sludge Using Enzymes, Microalgae and Yeast. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 166–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-166-177>

Введение

Промышленное производство микробной биомассы на основе микроводорослей или дрожжей как источников белка, липидов и других ценных продуктов предполагает использование дешевых ресурсов макро- и микроэлементов в составе питательных сред. В качестве источника углерода могут быть взяты углеводы, полученные гидролизом целлюлозосодержащих отходов с помощью специализированных ферментов [14, 16]. Вовлечение различных типов целлюлозосодержащих отходов может быть рациональным решением при организации сырьевой базы. Так, к примеру, в мире ежегодно образуются миллионы тонн макулатуры. Часть отходов бумаги возвращают на вторичную переработку для производства технических бумаг более низкого качества. Однако некоторые типы бумаг не находят применения и в лучшем случае утилизируются на мусорных полигонах [1]. Кроме макулатуры образуется значительное количество бумажного шлама, который практически не используется.

Применение биотехнологических методов получения моносахаров из целлюлозосодержащего сырья дает перспективу создания малоотходных экологически чистых технологий. Биопрепараты целлюлаз на основе селекционных штаммов грибов, включающие эндо-, экзоглюканазы и целлюбиазы, способны гидролизовать делигнифицированную целлюлозу с образованием глюкозы и целлюбиозы без побочных продуктов [3]. Также наравне с целлюлазами в препаратах, как правило, присутствуют гликозидазы, способные разрушать остаточные гемицеллюлозы. Ферментативная переработка макулатуры или бумажного шлама сопряжена с рядом трудностей из-за наличия различных загрязнений, а также наполнителей, которые необходимо удалять для более полной биоконверсии целлюлозной составляющей. Выявлено [15], что основным ингибитором целлюлаз является карбонат кальция, блокирующий активные центры ферментов. Авторам удалось частично решить эту проблему за счет применения неионогенных поверхностно-активных веществ, уменьшающих непродуктивное связывание биокатализаторов с солями кальция. Обработка макулатуры офисной бумаги серной кислотой также обеспечивала снижение ингибирующего действия карбоната кальция при ферментативном гидролизе [20]. Смолы, краски, остаточный лигнин и прочие наполнители бумаги являются еще одним фактором, препятствующим переработке отходов. Для уменьшения их ингибирующего действия была предложена обработка озоном [13], механическая активация [2], промывка щелочами и кислотами [5]. Таким обра-

зом, при наличии доступного целлюлозосодержащего субстрата и оптимальной предобработки возможно получение ценных продуктов с помощью микробной конверсии [8, 10].

Цель – разработка подходов к глубокой переработке бумажного шлама с помощью биокатализа, оценка применимости продуктов ферментативного гидролиза как питательной среды для культивирования микроводорослей и дрожжей.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования был использован отход производства санитарно-гигиенической бумаги «Тиссю Групп» (г. Сыктывкар, Республика Коми) – бумажный шлам. Бумажный шлам представляет собой смеси: наполнителей и пигментов, мелкого волокна и минеральных компонентов, печатных красок и наполнителей. Доля целлюлозной фракции достигает 38 ± 3 %. Среднесуточная масса образующегося на заводе шлама составляет 70–90 т по влажному весу, ее утилизируют методом захоронения на полигоне.

Биотестирование бумажного шлама по методикам ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.12-06 и ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 не выявило острой токсичности по отношению к *Daphnia magna* Straus и *Chlorella vulgaris* Beijer. Согласно результатам исследования, бумажный шлам относится к 5-му классу опасности. Некоторые химические параметры данного типа отходов:

Водородный показатель рН.....	7,7±0,1
Зольность, %.....	35,0±3,5
Содержание, мг/кг:	
кремний.....	22530±6760
алюминий.....	2,3±0,8
калий.....	35,4
натрий.....	276±41
кальций.....	281±14
магний.....	198±10
хром.....	15,1±4,5
медь.....	15,0±0,7
кадмий.....	<0,01
свинец.....	4,1±0,9
цинк.....	7,6±3,7
железо.....	175±26
никель.....	10±1
марганец.....	30±10
хлорид ион.....	133±13
нитрит ион.....	0,68±0,27
сульфат ион.....	1210±181
формальдегид.....	7,17±1,72
сумма предельных углеводов.....	<0,2

Были оценены различные режимы обработки шлама перед ферментативным получением восстанавливающих сахаров (ВС), определяемых методом Шо-моди–Нельсона [3]:

без предварительной обработки;

обработка в течение 30 мин раствором уксусной кислоты из расчета 5 см³ ледяной кислоты на 25 г бумажного шлама, суспензированного в 100 см³ воды, промывка водой на нетканом фильтре (условное обозначение режима – УК);

экстракция спиртом 25 г бумажного шлама в течение 2 ч в аппарате Сокслета на водяной бане, промывка водой на нетканом фильтре (ЭС);

обработка в течение 30 мин раствором минеральной (соляной или азотной) кислоты из расчета 5 см³ концентрированной кислоты на 25 г бумажного шлама, суспензированного в 100 см³ воды, промывка водой на нетканом фильтре (МК).

Ферментативный гидролиз навесок бумажного шлама массой 25 г (23,0±1,2 % сухого вещества) проводили в 0,05 М калий-цитратно-фосфатном буферном растворе (100 см³, рН – 4,7) при 50 °С. Перемешивание осуществляли с помощью верхнеприводной мешалки. В качестве источника целлюлаз использовали ферментный препарат Sunson (Китай). Активность составляла: общая целлюлазная – 90 000 ед./г, ксиланазная – 200 000 ед./г, β-глюкозидазная – 60 000 ед./г. За единицу активности принимали такое количество ферментного препарата, которое образует 1 мкмоль ВС в пересчете на глюкозу за 1 ч из фильтровальной бумаги для целлюлазной, из ксилана – для ксиланазной и из пара-нитрофенил-β-D-глюкопиранозиды – для β-глюкозидазной. Дозировка препарата – 0,1 г. Дополнительно в реакционную среду вводили 10 мг лаурилглюкозида. Фотографии образцов целлюлозного волокна из шлама были получены с помощью микроскопа Mikmed 2 (версия 11) в проходящем свете, с камерой RisingCam E3 Sony IMX226 12 MP; программное обеспечение – RisingView. Использовали объектив с увеличением в 10 раз. Определение углеводного состава гидролизатов проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе Kanuer с рефрактометрическим детектором Smartline 2300, сорбент – Sepaharon SGH NH₂ 7 мкм, элюент – ацетонитрил/вода в соотношении 80:20, скорость подачи элюента – 1 см³/мин.

Сравнительная оценка накопления биомассы микроводорослей проведена при различных режимах культивирования. Для этого выбраны две наиболее часто используемые в биотестировании водоросли: *Tetrademus obliquus* (Turpin) M.J. Wynne (SYKOA Ch-055-12) и *C. vulgaris* (SYKOA Ch-011-10) из коллекции живых штаммов микроводорослей Института биологии Коми научного центра УрО РАН. Накопительные культуры этих микроорганизмов наращивали в течение 2 недель на жидкой питательной среде Болда для зеленых водорослей [6] с рН = 6 при освещении 45 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ фотосинтетически активной радиации (фитолампа – Uniel ULI-P11-35W/SPFR IP40 WHITE, Китай) и температуре 22–25 °С. Соотношение периодов день/ночь – 12/12 ч.

В ходе эксперимента было использовано три варианта сред: Bristol [6], Bristol + глюкоза, гидролизат бумажного шлама с добавлением NaNO₃. В шесть флаконов вносили по 30 см³ стерильной среды Bristol. В три из них добавляли по 1 см³ накопительной культуры *T. obliquus*, в три – по 1 см³ накопительной культуры *C. vulgaris*. В другие шесть флаконов вносили по 30 см³ стерильной среды Bristol, которая содержала глюкозу в концентрации 5 мг/см³, и в них добавляли водоросли, как указано выше. Отдельно готовили стерильную среду на основе гидролизата бумажного шлама (с добавлением 50 мг NaNO₃ на 100 см³ гидролизата) с концентрацией ВС 4,5 мг/см³, затем разливали ее по 30 см³ в шесть флаконов и повторяли процедуру с внесением

микроводорослей. Культивирование проводили на орбитальном шейкере при 120 об./мин и температуре 25 °С. В качестве источника освещения выступала светодиодная лампа мощностью 24 Вт. Оценку накопления биомассы микроводорослей выполняли с помощью измерения оптической плотности при 680 нм на спектрофотометре UV-1700 (Shimadzu, Япония) с кюветой 10 мм.

Гидролизаты бумажного шлама использовали для аэробного нестерильного культивирования коммерчески доступных дрожжей, применяемых в сыроделии: *Candida utilis* PAL D, *Debaryomyces hansenii* SWING LAF-3, *D. hansenii* SWING R, *D. hansenii* SWING F, *Kluyveromyces marxianus* SWING LAF-5 (Дания). Питательная среда для выращивания дрожжей представляла собой 100 см³ гидролизата бумажного шлама с концентрацией ВС 13,0±1,5 мг/см³, в которую вносили 30 мг лиофильно высушенной культуры дрожжей. Также в среду было добавлено 600 мг NH₄NO₃, 10 мг MgSO₄, 50 мг NaCl и 200 мг KH₂PO₄. Начальное значение pH среды составляло 4,8. Накопление биомассы проводили на орбитальном шейкере при 170 об./мин и температуре 32 °С. Продолжительность выращивания – 24 ч. Накопление биомассы дрожжей оценивали фильтрованием на микропористой мембране (0,2 мкм) с последующей сушкой и взвешиванием. Все эксперименты осуществляли в 3-кратной повторности.

Результаты исследования и их обсуждение

Бумажный шлам, несмотря на значительную долю делигнифицированной целлюлозы, является достаточно сложным субстратом для ферментативного гидролиза без предварительной обработки (см. таблицу). Главным образом это связано с тем, что карбонаты кальция и прочих металлов вызывают переход pH среды в щелочную область, что приводит к снижению ферментативной активности. В связи с этим были изучены различные варианты предобработки с помощью уксусной, соляной и азотной кислот и затем проведена отмывка целлюлозосодержащего субстрата от солей.

Влияние способа предобработки бумажного шлама на выход ВС в результате ферментативного гидролиза

The influence of the paper sludge pretreatment method on the yield of reducing sugars as a result of enzymic hydrolysis

Варианты предобработки	Продолжительность гидролиза, ч	Выход ВС от массы абсолютно сухого бумажного шлама, %
МК	8	Гидролиз не идет, pH смещается в щелочную среду
УК	24	18±1,5
ЭС, УК	8	19±1,2
	14	20±1,3
	24	24±0,4
	36	25±0,2
ЭС, МК	24	29±1,5
ЭС, УК. Вместо ферментного препарата внесен непрогидролизванный остаток бумажного препарата	24	16±1,4

Выявлено, что предобработка бумажного шлама минеральными кислотами увеличивала выход сахаров на 10–15 % по сравнению с обработкой уксусной кислотой. Дополнительный выход ВС при ферментативном гидролизе после предобработки кислотами был достигнут за счет предварительной экстракции бумажного шлама спиртом или ацетоном, которые обеспечили извлечение красящих и других органических веществ. Установлено, что около 80 % от суммарного количества ВС образуется за первые 10–12 ч. После 24 ч ферментативный гидролиз практически прекращается. Во всех вариантах доля абсолютно сухого непрогидролизованного остатка составила порядка 43 ± 2 % от сухого вещества бумажного шлама. Основными продуктами гидролиза являлись ксилоза и глюкоза, причем доля последней была примерно 80 %. Следовательно, ферментный препарат обеспечивал полную конверсию доступной фракции целлюлозы и остаточного ксилана, что немаловажно для последующего культивирования микроорганизмов, т. к. в стандартных средах используются, как правило, моносахариды.

Снижение расхода ферментов можно рассматривать как ключевой элемент экономики ферментативного гидролиза целлюлозосодержащих материалов [7, 18]. Смешивание непрогидролизованного остатка со свежей порцией бумажного шлама способствовало повторному применению ранее введенных целлюлаз (см. таблицу). В ходе эксперимента удавалось провести 2 цикла ферментативного гидролиза с вовлечением непрогидролизованных остатков с предыдущих стадий. В дальнейшем повторение циклов было нецелесообразно из-за слишком высокой концентрации субстрата.

Непрогидролизованный остаток можно рассматривать как готовый носитель с иммобилизованными ферментами, пригодный для осахаривания сельскохозяйственных отходов [4, 12]. С технической точки зрения переработанный бумажный шлам представляет собой смесь порошковой целлюлозы, имеющей размеры волокон до 200 мкм (рис. 1), с другими высокомолекулярными компонентами, на основе которых возможно изготовление материалов, устойчивых к биодеструкции.

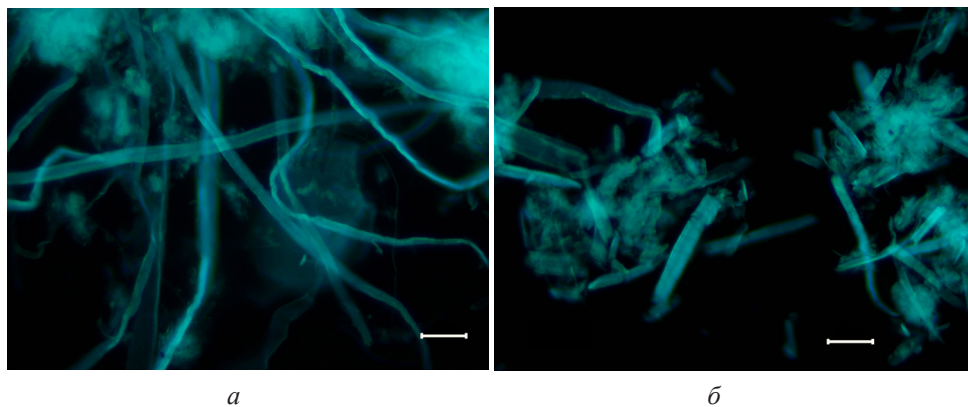


Рис. 1. Целлюлозные волокна бумажного шлама до (а) и после (б) ферментативного гидролиза. Масштабная линейка – 100 мкм

Fig. 1. The cellulose fibers of the paper sludge before (a) and after (b) enzymic hydrolysis. The scale rule – 100 μm

Таким образом, основные ингибиторы ферментативного гидролиза бумажного шлама – это карбонаты, а также красящие вещества. Предобработка

кислотами является ключевой стадией ферментативного получения ВС. Большую часть красителей можно извлечь экстракцией шлама такими растворителями, как спирт или ацетон.

Применение углеводов из непищевого сырья в составе питательных сред может снизить себестоимость получения целевых продуктов из микроводорослей за счет увеличения выхода биомассы [11, 17, 19]. Как видно из рис. 2, штаммы микроводорослей в зависимости от условий культивирования показали различную динамику роста. Введение дополнительного источника углерода – глюкозы или смеси моносахаридов из гидролизата бумажного шлама способствовало большему выходу биомассы микроводорослей по сравнению с фотоавтотрофным культивированием. При этом для культуры *T. obliquus* разница была более выражена. Среда, приготовленная на гидролизате бумажного шлама, оказалась самой благоприятной для роста клеток, что может быть связано с наличием в ней остатков перечисленных выше микроэлементов после обработки кислотами. В связи с этим при составлении питательных сред для последующего культивирования микроорганизмов необходимо учитывать присутствие микроэлементов в отходе.

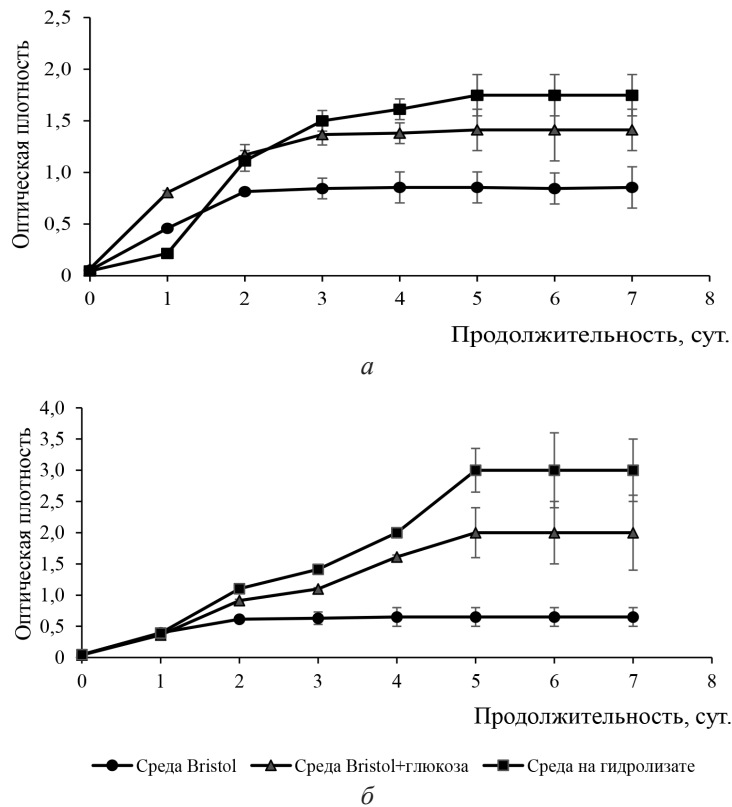


Рис. 2. Динамика роста *Chlorella vulgaris* (а) и *Tetradesmus obliquus* (б) при различных режимах культивирования. Максимальное значение оптической плотности соответствует показателям биомассы: а – 3,5 г/л; б – 5,5 г/л (сырой вес)

Fig. 2. The growth dynamics of *Chlorella vulgaris* (a) and *Tetradesmus obliquus* (b) in different culture conditions. The maximum optical density value corresponds to the biomass indicators: a – 3.5 g/l; b – 5.5 g/l (wet weight)

Следовательно, существенно увеличить скорость накопления биомассы микроводорослей можно за счет утилизации ВС после ферментативного гидролиза бумажного шлама. В то же время разработка технологии конверсии гидролизатов бумажного шлама с помощью микроводорослей требует соблюдения достаточно строгих стерильных условий, т. к. во всех экспериментах отмечена тенденция к бактериальному заражению на 4–5-е сутки культивирования. Эта проблема частично решалась введением в среду антибиотиков. Однако роль бактерий-спутников микроводорослей [9] при организации крупнотоннажного гетеро- или миксотрофного культивирования является предметом отдельных исследований.

В серии экспериментов по нестерильному выращиванию дрожжей (рис. 3) наиболее продуктивными (в пределах $2,10 \pm 0,14$ г воздушно-сухой массы дрожжей/дм³) оказались культуры *C. utilis* PAL D и *D. hansenii* SWING R. Степень конверсии ВС для них составила 70 ± 2 %. Большая часть из оставшихся сахаров (около 80 %) – это ксилоза. Полная утилизация сахаров происходила на 2-е сутки при добавлении в среду дополнительного источника азота.

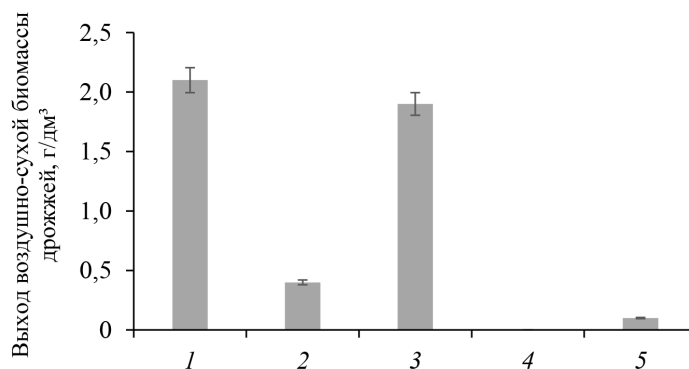


Рис. 3. Результаты выращивания дрожжей на гидролизате бумажного шлама: 1 – *Candida utilis* PAL D; 2 – *Debaryomyces hansenii* SWING LAF-3; 3 – *D. hansenii* SWING R; 4 – *D. hansenii* SWING F; 5 – *Kluyveromyces marxianus* SWING LAF-5

Fig. 3. The results of yeast cultivation on the paper sludge hydrolysate: 1 – *Candida utilis* PAL D; 2 – *Debaryomyces hansenii* SWING LAF-3; 3 – *D. hansenii* SWING R; 4 – *D. hansenii* SWING F; 5 – *Kluyveromyces marxianus* SWING LAF-5

В эксперименте без добавления микро- и макроэлементов полная утилизация ВС была достигнута за счет использования отработанной питательной среды после отделения дрожжей для миксотрофного культивирования микроводорослей (рис. 4). Культуры *D. hansenii* SWING F, *D. hansenii* SWING LAF-3 и *K. marxianus* SWING LAF-5 оказались не способны расти в заданных условиях, а при их культивировании более 1 сут. на среде отмечали бактериальное заражение.

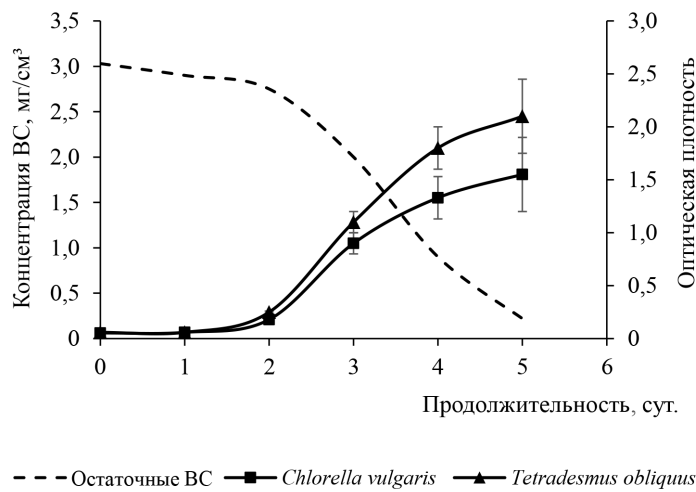


Рис. 4. Утилизация остаточных ВС микроводорослями после отделения дрожжевой биомассы

Fig. 4. Utilization of the residual reducing sugars by microalgae after the separation of yeast biomass

Как указано выше, кислотная предобработка бумажного шлама является ключевой стадией перед последующей биоконверсией полисахаридной составляющей. При этом формируется источник вторичного загрязнения – раствор солей. Использование на стадии предобработки азотной кислоты позволяет вводить нитратные соли в качестве источника азота.

Для оценки этой возможности $5,8 \pm 0,5$ г нитратных солей (образовывались после обработки 25 г бумажного шлама) добавляли в гидролизат с последующим культивированием *C. utilis* PAL D или *D. hansenii* SWING R. В результате выход воздушно-сухой биомассы дрожжей составил $3,9 \pm 0,2$ г/дм³. Следовательно, продукты предварительной обработки бумажного шлама азотной кислотой не содержали токсичных веществ и могли выступать как минеральная основа питательной среды. При этом дрожжи оказались устойчивы к повышенной концентрации солей.

Заключение

Применение химических и биотехнологических подходов позволяет перевести в полезные продукты часть сухого вещества бумажного шлама. Однако полная утилизация отхода предполагает получение продуктов для достаточно удаленных сфер использования. Для предприятия, ориентированного на сбор, переработку и получение готовой продукции из макулатуры, организация процесса глубокой переработки бумажного шлама будет актуальна только при значительном увеличении затрат на традиционное захоронение на полигонах или сжигание. Получение особо чистых ВС из гидролизата в экономическом плане представляет довольно затратную процедуру. В связи с этим целесообразно применять полученные сахара для микробиологической конверсии. Выявлено,

что ВС гидролизатов бумажного шлама являются благоприятной средой для миксотрофного культивирования микроводорослей. Подобраны штаммы дрожжей, которые обеспечивают приемлемый выход биомассы при нестерильном выращивании на гидролизатах бумажного шлама, но при этом в среду необходимо добавлять дополнительный источник азота. Экономические затраты на предварительную обработку бумажного шлама азотной кислотой можно нивелировать последующим использованием полученных солей в качестве источника азота для культивирования дрожжей. За счет этого выход биомассы дрожжей увеличивается почти в 2 раза. Таким образом, ВС из бумажного шлама могут служить хорошей альтернативой углеводам из пищевого сырья для микробиологических производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Болотова К.С., Травина О.В., Аксенов А.С., Емельянова М.В., Рудакова В.А., Канарский А.В. Биоконверсия целлюлозосодержащих материалов в условиях Арктического региона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 179–186.
Bolotova K.S., Travina O.V., Aksenov A.S., Emelyanova M.V., Rudakova V.A., Kanarskiy A.V. Bioconversion of Cellulose-Containing Materials in the Arctic Region Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 4, pp. 179–186. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.179>
2. Голязимова О.В., Политов А.А., Ломовский О.И. Механическая активация ферментативного гидролиза лигноцеллюлозы // Химия растит. сырья. 2009. № 2. С. 59–63.
Golyazimova O.V., Politov A.A., Lomovskiy O.I. Mechanical Activation of Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulose. *Khimija rastitel'nogo syr'ya*, 2009, no. 2, pp. 59–63. (In Russ.).
3. Польшалина Г.В., Чередниченко В.С., Римарева Л.В. Определение активности ферментов: справочник. М.: ДеЛи принт, 2003. 375 с.
Polygalina G.V., Cherednichenko V.S., Rimareva L.V. *Determination of Enzyme Activity: Handbook*. Moscow, DeLi print Publ., 2003. 375 p. (In Russ.).
4. Aarti C., Khusro A., Agastian P. Saccharification of Alkali Pre-Treated Aquatic Weeds Biomass Using Partially Purified Cellulase Immobilized on Different Matrices. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2022, vol. 39, art. no. 102283. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102283>
5. Aghmashhadi O.Y., Asadpour G., Garmaroody E.R., Zabihzadeh M., Rocha-Meneses L., Kikas T. The Effect of Deinking Process on Bioethanol Production from Waste Banknote Paper. *Processes*, 2020, vol. 8, iss. 12, art. no. 1563. <https://doi.org/10.3390/pr8121563>
6. *Algal Culturing Techniques*. Ed. by R.A. Andersen. Burlington, San Diego, London, Elsevier Academic Press, 2005. 578 p.
7. Arthur W., Diedericks D., Coetzee G., Rensburg Van E., Görgens J.F. Kinetic Modelling of Cellulase Recycling in Paper Sludge to Ethanol Fermentation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, iss. 5, art. no. 105981. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2021.105981>
8. Campano C., Miranda R., Merayo N., Negro C., Blanco A. Direct Production of Cellulose Nanocrystals from Old Newspapers and Recycled Newsprint. *Carbohydrate Polymers*, 2017, vol. 173, pp. 489–496. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.073>
9. Cooper M.B., Smith A.G. Exploring Mutualistic Interactions between Microalgae and Bacteria in the Omics Age. *Current Opinion in Plant Biology*, 2015, vol. 26, pp. 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2015.07.003>
10. Fidio Di N., Dragoni F., Antonetti C., Bari De I., Raspolli Galletti A.M., Ragolini G. From Paper Mill Waste to Single Cell Oil: Enzymatic Hydrolysis to Sugars and Their

Fermentation into Microbial Oil by the Yeast *Lipomyces starkeyi*. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 315, art. no. 123790. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123790>

11. Karnaouri A., Chalima A., Kalogiannis K.G., Varamogianni-Mamatsi D., Lappas A., Topakas E. Utilization of Lignocellulosic Biomass towards the Production of Omega-3 Fatty Acids by the Heterotrophic Marine Microalga *Cryptocodinium cohnii*. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 303, art. no. 122899. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122899>

12. Kim J.K., Yang J., Park S.Y., Yu J.-H., Kim K.H. Cellulase Recycling in High-Solids Enzymatic Hydrolysis of Pretreated Empty Fruit Bunches. *Biotechnology for Biofuels*, 2019, vol. 12, art. no. 138. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1476-x>

13. Kojima Y., Yoon S.-L. Improved Enzymatic Hydrolysis of Waste Paper by Ozone Pretreatment. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2008, vol. 10, pp. 134–139. <https://doi.org/10.1007/s10163-007-0198-5>

14. Min B.C., Bhayani B.V., Jampana V.S., Ramarao B.V. Enhancement of the Enzymatic Hydrolysis of Fines from Recycled Paper Mill Waste Rejects. *Bioresources and Bioprocessing*, 2015, vol. 2, art. no. 40. <http://dx.doi.org/10.1186/s40643-015-0068-2>

15. Min B.C., Ramarao B.V. Mechanisms of the Inhibition of Enzymatic Hydrolysis of Waste Pulp Fibers by Calcium Carbonate and the Influence of Nonionic Surfactant for Mitigation. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2017, vol. 40, pp. 799–806. <https://doi.org/10.1007/s00449-017-1745-7>

16. Naicker J.E., Govinden R., Lekha P., Sithole B. Transformation of Pulp and Paper Mill Sludge (PPMS) into a Glucose-Rich Hydrolysate Using Green Chemistry: Assessing Pretreatment Methods for Enhanced Hydrolysis. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 270, art. no. 110914. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110914>

17. Pandey A., Gupta A., Sunny A., Kumar S., Srivastava S. Multi-Objective Optimization of Media Components for Improved Algae Biomass, Fatty Acid and Starch Biosynthesis from *Scenedesmus* sp. ASK22 Using Desirability Function Approach. *Renewable Energy*, 2020, vol. 150, pp. 476–486. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.095>

18. Rodrigues Reis C.E., Libardi Junior N., Bento H.B.S., Carvalho de A.K.F., Souza Vandenberghe de L.P., Soccol C.R., Aminabhavi T.M., Chandel A.K. Process Strategies to Reduce Cellulase Enzyme Loading for Renewable Sugar Production in Biorefineries. *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 451, part 2, art. no. 138690. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138690>

19. Tian-Yuan Z., Yin-Hu W., Jing-Han W., Xiao-Xiong W., Deantes-Espinosa V.M., Guo-Hua D., Xin T., Hong-Ying H. Heterotrophic Cultivation of Microalgae in Straw Lignocellulose Hydrolysate for Production of High-Value Biomass Rich in Polyunsaturated Fatty Acids (PUFA). *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 367, pp. 37–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.049>

20. Wang X., Song A., Li L., Li X., Zhang R., Bao J. Effect of Calcium Carbonate in Waste Office Paper on Enzymatic Hydrolysis Efficiency and Enhancement Procedures. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2011, vol. 28, pp. 550–556. <http://dx.doi.org/10.1007/s11814-010-0365-6>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

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

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



Научная статья

УДК 581.522.4:582.475.4(470.21)

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-178-188

Pinus sibirica Du Tour в условиях интродукции на примере Полярно-альпийского ботанического сада-института

О.А. Гончарова[✉], канд. биол. наук, ст. науч. сотр.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8881-8522>

О.Е. Зотова, мл. науч. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4986-606X>

Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Кольского научного центра РАН, ул. Ферсмана, д. 18 а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; goncharovaoa@mail.ru[✉], ol-sha@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.22 / Одобрена после рецензирования 31.05.22 / Принята к печати 01.06.22

Аннотация. Исследование проведено в Полярно-альпийском ботаническом саду-институте – самом северном ботаническом саду России (67°38' с. ш.). Цель работы – комплексный анализ состояния деревьев сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour) при интродукции в условиях Заполярья. Обследовано состояние 8 экземпляров вида, выращиваемых на экспериментальном участке в г. Апатиты. Анализировали фенологическое развитие: набухание и раскрытие вегетативных почек, окончание роста и созревания хвои, начало и окончание роста годичных побегов, одревеснение побегов, начало и конец пыления. Оценивали степень одревеснения годичного побега, зимостойкость, габитус, побегообразовательную способность, прирост в высоту, генеративное развитие, размножение в культуре. Определяли риск падения дерева путем рассмотрения его окружения, подверженности воздействию ветра. Изучали зону корней, комель, ствол, основание кроны, скелетные ветви, крону на наличие дупел, трещин, разложения, плодовых тел грибов, повреждений, слабых развилок, мертвых ветвей и т. п. Применение подхода, объединяющего анализ сезонного развития, жизнеспособности и риска падения дерева, перспективно для комплексной и объективной оценки состояния деревьев сосны сибирской по морфо-фенологическим признакам при интродукции в Арктической зоне РФ. Фенологический ритм исследованных деревьев соответствует условиям окружающей среды при интродукции в Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина. Вегетация начинается в последних числах мая, к концу августа годичные побеги одревесневают, что говорит о готовности растений к зимнему периоду. Близкие сроки наступления фенофаз и их низкое варьирование могут свидетельствовать о невысокой обусловленности сезонного развития сосны сибирской метеоусловиями при интродукции в центральную часть Кольского полуострова. Деревья зимостойки, сохраняют присущую виду жизненную форму, обладают высокой побегообразовательной способностью и ежегодно прирастают в высоту, достигают генеративной стадии развития. Для размножения в культуре необходимо привлечение семенного материала из других регионов. Деревья 1-ствольные 1- и 2-вершинные, отличаются густой кроной, верхушечные и боковые побеги развиты, в редких случаях прирост боковых побегов уменьшен. На стволах отмечены V-образные развилки, на

© Гончарова О.А., Зотова О.Е., 2024



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

одном из деревьев обнаружено дупло в зоне комеля. Дополнительно необходимо инструментальное обследование для определения воздействия болезни или патогена на устойчивость деревьев.

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, *Pinus sibirica* Du Tour, интродукция, фенологическое развитие, риск падения дерева, жизнеспособность, Мурманская область

Благодарности: Работы выполнены на уникальной научной установке «Коллекция живых растений Полярно-альпийского ботанического сада-института», регистрационный номер – 499394.

Для цитирования: Гончарова О.А., Зотова О.Е. *Pinus sibirica* Du Tour в условиях интродукции на примере Полярно-альпийского ботанического сада-института // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 178–188. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-178-188>

Original article

***Pinus sibirica* Du Tour in the Conditions of Introduction by the Example of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute**

Oksana A. Goncharova[✉], Candidate of Biology, Senior Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8881-8522>

Olesya E. Zotova, Junior Research Scientist;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4986-606X>

Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N.A. Avrorin of the Kola Science Centre of the RAS, ul. Fersmana, 18a, Apatity, Murmansk Region, 184209, Russian Federation; goncharovaoa@mail.ru[✉], ol-sha@mail.ru

Received on March 2, 2022 / Approved after reviewing on May 31, 2022 / Accepted on June 1, 2022

Abstract. The study has been conducted at the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, the northernmost botanical garden in Russia (67°38' N). The aim of this work has been a comprehensive analysis of the condition of Siberian stone pine trees (*Pinus sibirica* Du Tour) during their introduction in the Arctic. The condition of 8 specimens of the species cultivated at the experimental plot in the town of Apatity has been examined. Their phenological development has been analyzed: the swelling and breaking of the vegetative buds, the end of the elongation and maturation of the needles, the beginning and end of growth of the annual shoots, the lignification of the shoots, the beginning and end of pollen dispersion. The degree of lignification of the annual shoot, the winter hardiness, the habit, the shoot-forming capacity, the height increment, the generative development and the reproduction in the plantation have also been assessed. The risk of a tree falling has been determined by considering its surroundings and exposure to wind. The root zones, the butts, the trunks, the crown bases, the boughs and the crowns have been examined for the presence of hollows, cracks, decomposition, fungal fruit bodies, damage, weak forks, dead branches, etc. The application of an approach combining the analysis of seasonal development, viability and risk of tree fall is promising for a comprehensive and objective assessment of the condition of Siberian stone pine trees by morphological and phenological characteristics during the introduction to the Arctic zone of the Russian Federation. The phenological rhythm of the studied trees corresponds to the environmental conditions during the introduction to the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N.A. Avrorin. Vegetation begins in late

May. By the end of August the annual shoots lignify, which indicates the readiness of the plants for the winter period. The close timing of the onset of phenophases and their low variation may indicate a low dependence of the seasonal development of Siberian stone pine on weather conditions during the introduction to the central part of the Kola Peninsula. The trees are winter-hardy, retain the life form inherent to the species, have a high shoot-forming capacity and annual height increment. They reach the generative stage of development. For their propagation in the plantation, it is necessary to attract seed material from other regions. The trees are monocormic, unimucronate and bimucronate. They are characterized by dense crowns. Their apical and lateral shoots are developed. In rare cases, the increment of lateral shoots is reduced. The V-shaped forks have been noted on the stems and a hollow in the butt area has been found on one of the trees. An additional instrumental examination is needed to determine the effect of diseases or pathogens on the stability of the trees.

Keywords: Siberian stone pine, *Pinus sibirica* Du Tour, introduction, phenological development, risk of a tree falling, viability, the Murmansk Region

Acknowledgements: The work was carried out at the unique scientific installation “The Collection of living plants of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute”, reg. no. 499394.

For citation: Goncharova O.A., Zotova O.E. *Pinus Sibirica* Du Tour in the Conditions of Introduction by the Example of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 2, pp. 178–188. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-178-188>

Введение

Ботанические сады являются значимыми экологическими ресурсами для изучения, демонстрации и поддержания разнообразия растений, поскольку способствуют накоплению знаний о растениях, играют центральную роль в сохранении и применении их разнообразия во всем мире [15, 16, 19]. Живые коллекции растений используются для садоводческих исследований, фенологических наблюдений, поддержания экспозиции, предоставления материалов для обмена семенами и восстановления среды обитания [20].

Растения в ботанических садах, находясь в условиях интродукции, испытывают воздействие окружающей среды, нарушающее декоративность растений, вызывающее ослабление, влияющее на продолжительность жизни.

Фенологические наблюдения за интродуцированными видами помогают в решении вопросов о реакции растений на изменение климата, поскольку фенология тесно связана с ним [20, 21, 23]. Мониторинг интродуцированных растений должен быть источником постоянной и объективной информации о состоянии растений и действующих внешних факторах, способствующей устранению или снижению негативного влияния окружающей среды на растения.

В Полярно-альпийском ботаническом саду-институте (ПАБСИ) накоплен огромный объем материалов наблюдений за интродуцированными древесными растениями. Данные представлены в ряде работ [4, 18]. ПАБСИ является самым северным ботаническим садом России (67°38' с. ш.). Коллекционный фонд деревьев и кустарников размещен на основной территории сада в г. Кировске и на экспериментальном участке в г. Апатиты. В качестве объекта изучения выбраны растения сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour).

Сосна кедровая сибирская – уникальная порода, произрастающая на огромной территории и зарекомендовавшая себя как достаточно пластичный вид. Она интродуцирована в различных регионах РФ и содержится в коллекционных фондах ботанических садов и дендрариев [5, 6, 9, 12–14].

Л.А. Казаков [8] отмечает, что посадки хвойных интродуцированных растений на Кольском полуострове появились давно и были выполнены главным образом монастырями. Единичные посадки хвойных экзотов встречались и вблизи населенных мест. Целенаправленная интродукция началась с момента создания лесохозяйственных и ботанических учреждений. Исследование интродукции хвойных деревьев в ПАБСИ ведется со времени основания сада.

Цель настоящей работы – комплексный анализ состояния деревьев сосны кедровой сибирской при интродукции в условиях Заполярья (на примере ПАБСИ).

Объекты и методы исследования

В коллекции деревьев и кустарников ПАБСИ обследовано 8 экземпляров *P. sibirica*, выращиваемых на экспериментальном участке в г. Апатиты. Анализировали фенологическое развитие и зимостойкость [1, 3], жизнеспособность/перспективность интродукции по П.И. Лапину, С.В. Сидневой [10]. Категории состояния деревьев определяли по шкалам В.А. Алексеева [2], приложения 1 Шкалы категорий санитарного состояния деревьев (постановление правительства РФ от 09.12.2020 № 2047 «Об утверждении правил санитарной безопасности в лесах» и А. Roloff [22]. При описании кедров использовали базовую диагностику риска падения дерева [17]. Характеризовали окружение дерева, его подверженность воздействию ветра. Оценивали зоны корней, комель, ствол, основание кроны, скелетные ветви, крону на наличие дупел, трещин, признаков разложения, плодовых тел грибов, повреждений, слабых развилок, мертвых ветвей и т. п.

Статистическая обработка фенологических данных выполнена с использованием прикладной программы Excel на уровне $p < 0,05$. Дополнительно рассчитывали точность опыта и коэффициент вариации. При анализе коэффициента вариации использовали шкалу С.А. Мамаева [11]. Интерпретация статистических данных выполнена согласно Э.В. Ивантеру, А.В. Коросову [7].

Характеристика обследованных растений *P. sibirica* представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика интродуцированных растений *P. sibirica* в ПАБСИ

The characteristics of the introduced *P. sibirica* plants in the PABGI

Образец	№ дерева	Происхождение исходного материала*	Высота, м / диаметр, см	Зимостойкость, балл	Репродуктивное развитие	
					пыление	семеношение
I	1	1950-е гг., природное, Сибирь	8,4 / 20,5	1	Нерегулярное	
	2		7,6 / 18,5			
	3		9,6 / 26,0			
II	4	1982 г., природное, Ханты-Мансийск	9,0 / 23,5			

Окончание табл. 1

Образец	№ дерева	Происхождение исходного материала*	Высота, м / диаметр, см	Зимостойкость, балл	Репродуктивное развитие	
					пыление	семеношение
III	5	1984 г., природное, Тыва	9,4 / 29,0	1	Нерегулярное	Отсутствует
IV	6	Неизвестное	7,6 / 24,0		Нерегулярное	
V	7	1951 г., культурное, Москва	9,8 / 23,5		Нерегулярное	Отсутствует
II	8	1982 г., природное, Ханты-Мансийск	6,8 / 17,0		Нерегулярное	

Примечание: *Указан год посева семян. Образец I представлен тремя экземплярами, II – двумя, III, IV, V – по одному экземпляру.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 сведены среднемноголетние фенологические данные интродуцированных растений *P. sibirica* на экспериментальном участке ПАБСИ. Анализировали сроки наступления следующих фенофаз: набухание и раскрытие вегетативных почек (Пч1 и Пч2), окончание роста и созревания хвои (ЛЗ), начало и окончание роста годичных побегов (Пб1 и Пб2), одревеснение побегов (О2), начало и конец пыления (Ц4 и Ц5). Фазы формирования и созревания шишек не рассматривали из-за ограниченного количества данных. Фенологические наблюдения за деревом 6 не проводились. Для исследования сезонного развития использовали информацию, полученную при фенологических наблюдениях в течение 2001–2021 гг.

Таблица 2

Среднемноголетние даты наступления фенологических фаз интродуцированных растений *P. sibirica* в ПАБСИ The average long-term dates of the onset of phenological phases of the introduced *P. sibirica* plants in the PABGI

Фенофаза	Показатель	№ дерева				
		1, 2, 3	4	5	7	8
Пч1	M±m _M	28.05±2,3	29.05±2,1	27.05±2,1	29.05±2,1	26.05±3,4
	CV	10,3	9,6	10,5	10,6	12,4
Пч2	M±m _M	7.06±2,2	8.06±2,4	11.06±1,8	13.06±2,0	7.06±2,4
	CV	8,4	8,9	6,9	8,1	7,7
Пб1	M±m _M	1.06±2,6	2.06±3,1	29.05±1,9	30.05±2,0	26.05±3,4
	CV	11,4	13,7	9,7	10,0	12,4
Пб2	M±m _M	3.07±3,6	6.07±4,0	6.07±3,0	15.07±3,5	6.07±3,5
	CV	10,7	12,6	10,4	9,1	9,1
О2	M±m _M	22.08±5,2	24.08±3,0	22.08±6,0	25.08±2,9	27.08±4,9
	CV	11,4	6,5	14,1	6,9	8,7

Окончание табл. 2

Фенофаза	Показатель	№ дерева				
		1, 2, 3	4	5	7	8
ЛЗ	$M \pm m_M$	23.07±3,1	28.07±4,1	26.07±4,1	25.07±3,6	24.07±3,7
	CV	6,4	9,0	9,2	7,7	7,1
Ц4	$M \pm m_M$	27.06±1,8	25.06±0,5	29.06±2,4	5.07±1,5	–
	CV	2,6	0,6	5,9	1,7	–
Ц5	$M \pm m_M$	7.07±4,1	5.07±4,5	10.07±3,1	8.07±2,1	–
	CV	6,3	5,0	7,5	2,9	–

Примечание: $M \pm m_M$ – среднемноголетняя фенодата ± ошибка среднемноголетней фенодаты; CV – коэффициент вариации, %.

Точность опыта не более 5 говорит о достаточно надежной выборочной оценке [7]. Среднемноголетнее прохождение фаз сезонного развития у изученных растений отмечается в близкие сроки. В конце мая – начале июня начинается набухание вегетативных почек и линейный рост побегов. На следующем этапе сезонного развития, в 1-й декаде июня, распускаются вегетативные почки, хвоя обособляется и идет в рост, процесс завершается в последних числах июня. Пыление и семеношение являются одними из важных показателей, характеризующих степень адаптации интродуцента в данных условиях. На экспериментальном участке ПАБСИ пыление сосны сибирской впервые отмечается в возрасте 27–32 лет, происходя в отдельные годы в конце июня – начале июля.

Результаты статистической обработки показали, что коэффициент вариации для большинства средних значений не превышает 12 %, что свидетельствует об очень низком и низком варьировании сроков наступления фенофаз. $CV \leq 7$ % у большинства обследованных деревьев выявлен для фенодат Ц4 и Ц5, что говорит об очень низком уровне варьирования сроков начала указанных фенофаз. Среди обследованных растений средняя степень варьирования сроков сезонного развития отмечена для фенодаты Пб1 у дерева 4 и фенодаты О2 у дерева 5.

Близкие сроки наступления фенологических фаз и их низкое варьирование могут свидетельствовать о слабой зависимости сезонного развития сосны сибирской от метеоусловий при интродукции в центральную часть Кольского полуострова.

Оценивая жизнеспособность *P. sibirica*, изучали степень одревеснения годичного побега, зимостойкость, габитус, побегообразование, прирост в высоту, генеративное развитие и размножение в культуре (табл. 3). В связи с тем, что семена завязываются, но отсутствует возможность проверить их всхожесть, способность к генеративному развитию у деревьев с нерегулярным пылением/семеношением оценили в 23 балла (среднее значение между градациями «семена созревают» и «семена не созревают»).

Анализ жизнеспособности сосны кедровой показал, что деревья зимостойки, сохраняют присущую виду жизненную форму, обладают высокой побегообразовательной способностью и ежегодно прирастают в высоту.

Таблица 3

Оценка жизнеспособности интродуцированных растений *P. sibirica* в ПАБСИ
The viability assessment of the introduced *P. sibirica* plants in the PABGI

№ дерева	Одревеснение побега	Зимостойкость	Габитус*	Побегообразовательная способность	Прирост в высоту	Генеративное развитие	Размножение	Сумма	Группа жизнеспособности	
										баллы
1	20	25	10	5	5	23	1	89	2	
2										
3										
4										
5						15				
6						23				
7				1	2	15		74		3
8				5	5	23		89		2

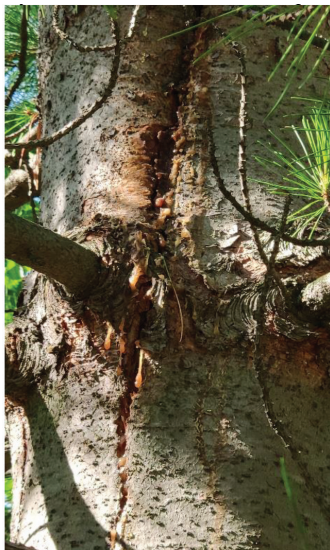
*Оценивали сохранение формы роста.

Исключение составляет дерево 7: не отмечено ежегодного прироста и побегообразовательная способность характеризуется как слабая. Деревья достигли генеративной стадии развития, семеношение не зафиксировано у экземпляров 5 и 7. Для размножения в культуре необходимо привлечение семенного материала из других регионов, т. к. созревание семян нерегулярное или отсутствует. Деревья 1–6 и 8 отнесли к группе жизнеспособных, дерево 7 – менее жизнеспособных.

Результаты базовой диагностики риска падения деревьев представлены на рисунке.

Обследованные деревья частично защищены от воздействия ветра, места их потенциального падения не используются под посадки или постройки, т. к. деревья произрастают на территории коллекционных участков ПАБСИ. Для всех деревьев нет каких-либо ограничений развития корневой системы. Нарушения в зоне комля не обнаружены, только на дереве 7 в зоне комля есть дупло.

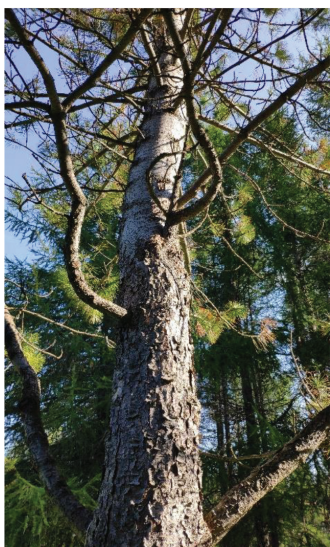
Обследованные деревья кедра являются 1-ствольными, среди них встречаются 1- и 2-вершинные. Кроны симметричные, полноценно развитые, густые, изреженная крона отмечена в единственном случае – у дерева 7. Нижние живые ветви в кронах располагаются на высоте около 50 см от почвы, исключение вновь составляет дерево 7. В кроне дерева 5 есть зависшие мертвые скелетные побеги, повреждение произошло в результате снеголома. Мертвые скелетные ветви наблюдаются и в кроне дерева 7. Сухие ветви в нижней трети кроны зафиксированы у дерева 2. Наклон стволов отсутствует, у дерева 7 установлено искривление ствола на высоте 2,5 м. На стволах нет водяных побегов, табачных сучьев. Следы смолотечения не обнаружены только на стволах деревьев 3 и 6. Смолотечение в нижней трети ствола наблюдается у деревьев 1, 4, 7 и 8, на стволе у основания кроны – у деревьев 5 и 7, возле слабых развилок – у деревьев 2 и 4.



а



б



в



г

Результаты диагностики риска падения деревьев *P. sibirica* в коллекции ПАБСИ: а – смолотечение и трещина на дереве 4; б – поврежденные снегом ветви дерева 5; в – изреженная крона, сухие скелетные ветви дерева 7; г – крона дерева 3

The results of the diagnosis of the risk of *P. sibirica* trees falling in the PABGI collection: а – the resinosis and the crack on the tree no. 4; б – the snow-damaged branches of the tree no. 5; в – the thinned crown and dry boughs of the tree no. 7; г – the crown of the tree no. 3

Согласно шкалам Алексева, приложения 1 постановления «Об утверждении Правил...» и А. Rollof, деревья 1–3 и 6 имеют категории 1, 1 и 0 соответственно. Эти деревья здоровые без признаков ослабления, крона развита полноценно для данных породы, возраста и местопроизрастания, верхушечные и боковые побеги растут динамично и равномерно, отсутствуют значи-

мые повреждения ствола, скелетных побегов. Дерево 4, согласно использованным шкалам, имеет категории 2, 1, 0 соответственно. Оно оценивается как ослабленное, крона полноценная, прирост боковых побегов замедлен, на стволе присутствуют повреждения. Деревья 5 и 8 принадлежат к категориям 2, 2, 1 соответственно, относятся к ослабленным, прирост побегов несколько замедлен, боковые более укорочены, чем верхушечные, есть повреждения ствола. Дерево 7 относится к категориям 3, 2, 2 соответственно, характеризуется как сильно ослабленное, крона изреженная, с сухими ветвями, прирост слабый, присутствует дупло. В дальнейшем рекомендуются следующие мероприятия: деревьям 2, 7, 8 необходима обрезка сухих ветвей; из кроны дерева 5 нужно удалить зависшие ветви; для всех деревьев необходим ежегодный мониторинг категории состояния.

Заключение

Фенологический ритм деревьев сосны кедровой сибирской соответствует условиям окружающей среды при интродукции в Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина. Вегетация начинается в последние дни мая, к концу августа годовые побеги одревесневают, что говорит о готовности растений к зимнему периоду. Низкая вариативность и близость сроков наступления фенофаз позволяют сделать вывод о консервативности наследственных качеств у обследованных деревьев и их незначительной реакции на изменение внешней среды.

Интродуцированные растения сосны сибирской в коллекционном фонде ПАБСИ являются здоровыми или ослабленными. Выращивание деревьев на коллекционных участках способствует тому, что почвенный покров не нарушен, корневая система не имеет ограничений для развития. Деревья 1-ствольные 1- и 2-вершинные. Отличаются густой кроной, верхушечные и боковые побеги развиты, в редких случаях прирост боковых побегов уменьшен. На стволах встречаются V-образные развилки, на одном из деревьев обнаружено дупло в зоне комеля. Отмеченные следы смолотечения могут быть признаком нарушений, что требует дополнительного инструментального обследования с целью определения воздействия болезни или патогена на устойчивость дерева.

Использованный подход, объединяющий анализ сезонного развития, жизнеспособности, риска падения дерева, показал себя перспективным для комплексной и объективной оценки состояния сосны кедровой сибирской по морфо-фенологическим признакам при интродукции в Арктической зоне РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Александрова М.С., Булыгин Н.Е., Ворошилов В.Н. Методика фенологических наблюдений в ботанических садах СССР. М.: ГБС АН СССР, 1975. 28 с.

Aleksandrova M.S., Bulygin N.E., Voroshilov V.N. *Technique of Phenological Observations in the Botanical Gardens of the USSR*. Moscow, Main Botanical Garden of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1975. 28 p. (In Russ.).

2. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.

Alekseev V.A. Diagnostics of the Vital State of Trees and Forest Stands. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*, 1989, no. 4, pp. 51–57. (In Russ.).

3. Булыгин Н.Е. Дендрология. Фенологические наблюдения над хвойными породами. Л.: ЛТА, 1974. 84 с.

Bulygin N.E. Dendrology. Phenological Observations on Conifers. Leningrad, Leningrad Forestry Academy Publ., 1974. 84 p. (In Russ.).

4. Виравчева Л.Л., Гончарова О.А., Кириллова Н.Р., Носатенко О.Ю., Тростенюк Н.Н. Редкие и исчезающие растения в интродукционной коллекции Полярно-альпийского ботанического сада-института // Hortus botanicus. 2019. Т. 14. С. 387–402.

Viracheva L.L., Goncharova O.A., Kirillova N.R., Nosatenko O.Y., Trostenyuk N.N. Rare and Disappearing Plants in the Introductory Collection of the Polar-Alpine Botanical Garden and Institute. *Hortus botanicus*, 2019, vol. 14, pp. 387–402. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j4.art.2019.6605>

5. Галкина М.А., Зуева М.А. Коллекция «Флора Сибири» в Главном ботаническом саду РАН (Россия) // Природоохр. исследования. Заповед. наука. 2018. Т. 3, № 1. С. 65–79.

Galkina M.A., Zueva M.A. Collection “Flora of Siberia” in the Main Botanical Garden of RAS (Russia). *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka* = Nature Conservation Research, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 65–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.24189/ncr.2018.009>

6. Емельянова О.Ю., Цой М.Ф., Павленкова Г.А., Масалова Л.И., Фирсов А.И. Генетическая коллекция дендрария ВНИИСПК как центр сохранения растительного биоразнообразия // Селекция и сортоведение садовых культур. 2017. Т. 4, № 1-2. С. 41–44.

Emelyanova O.Yu., Tsoi M.F., Pavlenkova G.A., Masalova L.I., Firsov A.I. Genetic Collection of the Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding Arboretum as a Center of Conservation of Plant Biodiversity. *Selektsiya i sortovazvedeniye sadovykh kul'tur* = Breeding and Variety Cultivation of Fruit and Berry Crops, 2017, vol. 4, no. 1–2, pp. 41–44. (In Russ.).

7. Ивантер Э.В., Коросов А.В. Элементарная биометрия. Петрозаводск: ПетрГУ, 2010. 104 с.

Ivanter E.V., Korosov A.V. *Elementary Biometrics*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2010. 104 p. (In Russ.).

8. Казаков Л.А. Интродукция хвойных в Субарктику. СПб.: Наука, 1993. 144 с.

Kazakov L.A. Introduction of Conifers into the Subarctic. St. Petersburg, Nauka Publ., 1993. 144 p. (In Russ.).

9. Кищенко И.Т. Сезонное развитие и перспективность интродуцированных видов *Pinus L.* в таежной зоне (Карелия) // Вестн. Перм. ун-та. Сер.: Биология. 2021. Вып. 3. С. 149–157.

Kishchenko I.T. Seasonal Development and Perspectivity of Introduced Species *Pinus L.* in the Taiga Area (Karelia). *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya Biologiya* = Perm University Herald. Biology, 2021, iss. 3, pp. 149–157. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2021-3-149-157>

10. Латин П.И., Сиднева С.В. Оценка перспективности интродукции древесных растений по данным визуальных наблюдений // Опыт интродукции древесных растений. М.: Наука, 1973. С. 7–67.

Lapin P.I., Sidneva S.V. Evaluation of the Prospects for the Introduction of Woody Plants according to Visual Observations. *Opyt introduktsii drevesnykh rastenij*. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 7–67. (In Russ.).

11. Мамеев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1973. 284 с.

Mamaev S.A. *Forms of Intraspecific Variability of Woody Plants (on the Example of the Pinaceae Family in the Urals)*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 284 p. (In Russ.).

12. Миняева Ю.М., Кытина М.А. Редкие виды в экспозициях флоры Сибири и Дальнего Востока ботанического сада ВИЛАР // Растения в муссонном климате: антропогенная и климатогенная трансформация флоры и растительности: материалы VIII науч. конф., Благовещенск, 18–21 сент. 2018 г. Благовещенск: Дальневост. ГАУ, 2018. С. 142–146.

Minyazeva Yu.M., Kytina M.A. Rare Species in the Exhibitions of the Flora of Siberia and the Far East of the ARSRIMAP Botanical Garden. *Plants in a Monsoon Climate: Anthropogenic and Climatogenic Transformation of Flora and Vegetation: Materials of the VIII Scientific Conference* (Blagoveshchensk, September 18–21, 2018). Blagoveshchensk, Far East State Agrarian University, 2018, pp. 142–146. (In Russ.).

13. Мкртчян М.А., Путенихина К.В. Интродуцированные виды рода *Pinus* L. в Башкирском Предуралье: фенологическое развитие // В мире науч. открытий. 2014. № 6. С. 41–54.

Mkrtychyan M.A., Putenikhina K.V. Introduced Species of *Pinus* L. in Bashkir Cis-Urals: Phenological Development. *V mire nauchnykh otkrytij* = In the World of Scientific Discoveries, 2014, no. 6, pp. 41–54. (In Russ.).

14. Раков Н.С., Старшова Н.П. Флора Ульяновского дендропарка: 1. Хвойные породы // Самар. Лука: проблемы регион. и глоб. экологии. 2019. Т. 28, № 1. С. 72–80.

Rakov N.S., Starshova N.P. Flora of the Ulyanovsk Arboretum: 1. Softwood. *Samarskaya Luka: problemy regional'noj i global'noj ekologii*, 2019, vol. 28, no. 1, pp. 72–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2073-1035-2019-10184>

15. Cannon C.H., Kua C.-S. Botanic Gardens Should Lead the Way to Create a “Garden Earth” in the Anthropocene. *Plant Diversity*, 2017, vol. 39, iss. 6, pp. 331–337. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2017.11.003>

16. Cavender N., Westwood M., Bechtoldt C., Donnelly G., Oldfield S., Gardner M., McNamara W. Strengthening the Conservation Value of *ex situ* Tree Collections. *Орх.*, 2015, vol. 49, iss. 3, pp. 416–424. <https://doi.org/10.1017/S0030605314000866>

17. *Drzewa w Krajobrazie. Podręcznik Praktyka* = Trees in the Landscape. Ed. by K. Witkoś-Gnach, P. Tyszkó-Chmielowiec. Wrocław: Fundacja EkoRozwoju Publ., 2014. 320 p.

18. Goncharova O., Lipponen I., Poloskova E., Zotova O. The Tree and Shrub Collections of the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute. *Sibbaldia: The International Journal of Botanic Garden Horticulture*, 2021, vol. 19, pp. 97–115. <https://doi.org/10.24823/Sibbaldia.2020.304>

19. Heywood V.H. The Future of Plant Conservation and the Role of Botanic Gardens. *Plant Diversity*, 2017, vol. 39, iss. 6, pp. 309–313. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2017.12.002>

20. Primack R.B., Miller-Rushing A.J. The Role of Botanical Gardens in Climate Change Research. *New Phytologist*, 2009, vol. 182, iss. 2, pp. 303–313. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02800.x>

21. Rafferty N.E., CaraDonna P.J., Burkle L.A., Iler A.M., Bronstein J.L. Phenological Overlap of Interacting Species in a Changing Climate: an Assessment of Available Approaches. *Ecology and Evolution*, 2013, vol. 3, iss. 9, pp. 3183–3193. <https://doi.org/10.1002/ece3.668>

22. Roloff A. *Baumkronen: Verständnis und Praktische Bedeutung eines Komplexen Naturphänomens* = Treetops: Understanding and Practical Significance of a Complex Natural Phenomenon. Stuttgart, Eugen Ulmer Verlag, 2001. 164 p. (in Germ.)

23. Rosbakh S., Hartig F., Sandanov D.V., Bukharova E.V., Miller T.K., Primack R.B. Siberian Plants Shift their Phenology in Response to Climate Change. *Global Change Biology*, 2021, vol. 27, iss. 18, pp. 4435–4448. <https://doi.org/10.1111/gcb.15744>

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

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

Научная статья

УДК 630*2

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-189-200

Сохранение видового разнообразия растений при лесопользовании в ключевых биотопах Вологодской области

Д.В. Беляков, аспирант; ResearcherID: [AAX-2399-2021](https://orcid.org/0000-0003-2588-1492),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2588-1492>

О.А. Конюшатов, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [JEZ-9194-2023](https://orcid.org/0009-0007-9819-4219),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9819-4219>

С.А. Корчагов[✉], д-р с.-х. наук, проф.; ResearcherID: [HLQ-4954-2023](https://orcid.org/0000-0001-5492-9550),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5492-9550>

С.Е. Грибов, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAY-2692-2021](https://orcid.org/0000-0002-0145-6136),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0145-6136>

Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Вологодская региональная лаборатория, ул. Горького, д. 83 а, г. Вологда, Россия, 160016; belyakovdima09111995@yandex.ru, okarkhangel@yandex.ru, korchagov@sevniilh-arh.ru[✉], griboff.s.e@mail.ru

Поступила в редакцию 19.09.23 / Одобрена после рецензирования 13.12.23 / Принята к печати 16.12.23

Аннотация. Сокращение количества биологических видов может вызвать утрату целостности биосферы и ее способности поддерживать важнейшие характеристики природной среды. Поэтому научные исследования и разработка практических рекомендаций в области сохранения биологического разнообразия при лесопользовании в настоящее время имеют особую актуальность. Меры по сохранению биоразнообразия при лесопользовании отражены в правилах заготовки древесины, лесохозяйственных регламентах лесничеств и проектах освоения лесов. Сохранение биологического разнообразия в ходе лесозаготовительных работ предусматривается путем выделения ключевых биотопов – лесных участков определенной площади, особо значимых как места обитания редких видов животных и растений. Анализ Красной книги Вологодской области показал, что 29 % редких видов приурочено к участкам леса вдоль водотоков. Исследование проведено на стационарных объектах в границах Вологодского лесничества Вологодской области (южно-таежный район европейской части Российской Федерации), представленных сплошными вырубками 2018–2019 гг. с сохраненными ключевыми биотопами – участками леса вдоль временных водных объектов. Средние показатели насаждений получены на основании материалов отвода и таксации лесосек до рубок. Проведение работ базировалось на лесоводственно-таксационных и эколого-биологических методах полевой и камеральной оценки. При полевых исследованиях (2023 г.) в ключевых биотопах выполнен пересчет деревьев по породам, диаметрам на высоте груди и категориям санитарного состояния с определением средних таксационных показателей древостоев. Описаны почвы и ботанический состав живого напочвенного покрова. Определены видовое разнообразие и численность видов растений в ключевых биотопах, а также на прилегающих участках – на вырубке и в древостое. Установлены более высокая численность видов таежной флоры и наличие редких видов растений в ключевых биотопах в отличие от вырубок, что свидетельствует о необходимости сохранения ключевых биотопов при проведении лесозаготовительных работ. В границах исследованных ключевых биотопов средняя

численность видов растений в буферной зоне превышает число видов в ядре биотопа, различия являются статистически достоверными. Поэтому в процессе отвода лесосек, кроме выделения центральной части – ядра биотопа, требуется оставлять буферную зону как территорию с наибольшей численностью видов.

Ключевые слова: биологическое разнообразие, стационарный объект, лесопользование, ключевой биотоп, временный водоток, древостой, живой напочвенный покров, виды растений

Благодарности: Публикация подготовлена по результатам работ, выполненных в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований по теме «Лесоводственно-экологическая оценка эффективности применения мер по сохранению биологического разнообразия при использовании лесов в таежной зоне». Регистрационный номер темы – 123030200023-2.

Для цитирования: Беляков Д.В., Конюшатов О.А., Корчагов С.А., Грибов С.Е. Сохранение видового разнообразия растений при лесопользовании в ключевых биотопах Вологодской области // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 189–200. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-189-200>

Original article

The Conservation of Plant Species Diversity in Forest Management in the Key Biotores of the Vologda Region

Dmitriy V. Belyakov, Postgraduate Student; ResearcherID: [AAX-2399-2021](https://orcid.org/0000-0003-2588-1492),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2588-1492>

Oleg A. Konyushatov, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [JEZ-9194-2023](https://orcid.org/0009-0007-9819-4219), ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9819-4219>

Sergey A. Korchagov[✉], Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [HLQ-4954-2023](https://orcid.org/0000-0001-5492-9550),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5492-9550>

Sergey E. Gribov, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAY-2692-2021](https://orcid.org/0000-0002-0145-6136),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0145-6136>

Northern Research Institute of Forestry, Vologda Regional Laboratory, ul. Gor'kogo, 83 a, Vologda, 160016, Russian Federation; belyakovdima09111995@yandex.ru, okarkhangel@yandex.ru, korchagov@sevniilh-arh.ru[✉], griboff.s.e@mail.ru

Received on September 19, 2023 / Approved after reviewing on December 13, 2023 / Accepted on December 16, 2023

Abstract. A reduction in the number of biological species can cause a loss of the integrity of the biosphere and its ability to maintain the most important characteristics of the natural environment. Therefore, scientific research and the development of practical recommendations in the field of conservation of biological diversity in forest management are currently of particular relevance. Measures to preserve biodiversity in forest management are reflected in the rules of timber harvesting, forestry regulations of forestries and forest development projects. The conservation of biological diversity in the course of logging operations is provided by allocating key biotores – forest plots of a certain area, especially significant as habitats for rare species of animals and plants. The analysis of the Red Book of the Vologda Region showed that 29 % of rare species are confined to forest areas along watercourses. The study has been conducted at stationary sites within the boundaries of the Vologda Forestry of the Vologda Region (the Southern taiga area of the European part of the Russian Federation), represented by clear cuttings of 2018–2019 with the preserved key biotores –



forest areas along temporary water bodies. The average values for the plantations have been obtained on the basis of the materials from allotment and taxation of the cutting areas before felling. The work has been based on silvicultural and taxation, as well as ecological and biological methods of field evaluation and desk assessment. During the field studies (2023) in the key biotopes, a tally has been carried out by tree species, their diameters at chest height and categories of sanitary condition, with the determination of the average taxation indicators of the stands. The soils and the botanical composition of the live ground cover have been described. The species diversity and abundance of plant species in the key biotopes, as well as in the adjacent areas – in the cuttings and in the stands – have been determined. A higher number of species of taiga flora and the presence of rare plant species in the key biotopes, in contrast to the cuttings, have been established, which indicates the need to preserve the key biotopes during logging operations. Within the boundaries of the key biotopes studied, the average number of plant species in the buffer zone exceeds the number of species in the core of the biotope, the differences are statistically significant. Therefore, in the process of allotment of cutting areas, in addition to the allocation of the central part, or the core of the biotope, it is necessary to preserve a buffer zone as the area with the largest number of species.

Keywords: biodiversity, stationary site, forest management, key biotope, temporary watercourse, stand, live ground cover, plant species

Acknowledgements: The publication is based on the results of the research carried out within the framework of the state assignment of the Federal Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry” to conduct applied scientific research on the topic “Silviculture and Environmental Assessment of the Effectiveness of Measures to Preserve Biological Diversity in the Use of Forests in the Taiga Zone”. The topic ID no. 123030200023-2.

For citation: Belyakov D.V., Konyushatov O.A., Korchagov S.A., Gribov S.E. The Conservation of Plant Species Diversity in Forest Management in the Key Biotopes of the Vologda Region. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 189–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-189-200>

Введение

Вопрос сокращения биологического разнообразия занимает особое место среди основных экологических проблем современности [12]. Он особенно актуален для лесных экосистем, характеризующихся наиболее высоким уровнем видового разнообразия, что связано с большим числом лесообразующих пород, вариантов пространственного и возрастного строения древостоев, а также с различиями условий произрастания. Множество лесных видов и их естественных местообитаний подвергаются разрушению вследствие антропогенного воздействия, в частности – вырубки лесов [13, 19, 22].

Сохранение биологического разнообразия на различных уровнях (уровень ландшафтов, уровень лесных сообществ и локальный уровень) регламентировано рядом национальных нормативно-правовых актов: приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 01.12.2020 № 993 «Об утверждении Правил заготовки древесины и особенностей заготовки древесины в лесничествах, лесопарках...», федеральные законы от 17.02.1995 № 16-ФЗ «О ратификации Конвенции о биологическом разнообразии», от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», от 04.12.2006 № 200-ФЗ «Лесной кодекс Российской Федерации». Требования сохранения объектов биоразнообразия на локальном уровне при лесопользовании включены в лесохозяйственные регламенты лесничеств (приказ департамента лесного комплекса Вологодской области от

26.10.2018 «Об утверждении лесохозяйственного регламента Вологодского лесничества Вологодской области»), проекты освоения лесов и технологические карты лесосечных работ.

Сохранение биологического разнообразия предусматривается путем выделения в ходе лесозаготовительных работ ключевых биотопов – лесных участков (биогеоценозов) определенной площади, имеющих большое значение в качестве местообитаний видов флоры и фауны и в которых не проводятся хозяйственные мероприятия [6, 15, 18, 26].

Цель исследования заключалась в оценке сохранения видового разнообразия растений в ключевых лесных биотопах на лесосеках.

Объекты и методы исследования

Исследование проведено на стационарных объектах «Кубено-Озерский» и «Новленское» в границах Вологодского лесничества Вологодской области. Объекты представляют собой сплошные вырубki прошлых лет с сохраненными ключевыми биотопами вдоль временных водных объектов с понижением рельефа местности в сторону водотока. При выполнении лесозаготовительных работ на лесных участках для сохранения ключевых биотопов вдоль временного водотока по обоим берегам на расстоянии 20 м одна от другой оставляли буферные зоны, которые имели слабо выраженное русло и характерные ландшафтные границы [10]. Русло заполняется водой в период паводков и половодий, в остальное время – пересыхает.

Анализ Красной книги Вологодской области [8] показал, что из 178 занесенных в нее лесных видов 52 (в т. ч. 33 растения, 19 животных) приурочено к участкам леса вдоль водотоков. Этот факт предопределил выбор объектов исследования.

Средние лесоводственно-таксационные показатели насаждений, полученные на основании материалов отвода и таксации лесосек до рубок, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика лесных участков в период проведения рубок The characteristics of the forest plots during the felling period

Показатель	Объект	
	Кубено-Озерский	Новленское
Расположение объекта	Вологодское лесничество, Кубено-Озерское участковое лесничество	Вологодское лесничество, Новленское участковое лесничество
Категория участка	Вырубка 2018 г.	Вырубка 2019 г.
Площадь вырубки, га	21,5	11,0
Неэксплуатационная площадь, га (ключевой биотоп)	1,3	1,5
Состав древостоя на лесосеке	6Б3Ос1Е	4С2Е4Б+Ос
Возраст древостоя, лет	75	85
Бонитет	I	II

Окончание табл. 1

Показатель	Объект	
	Кубено-Озерский	Новленское
Тип леса	Ельник черничный	Сосняк черничный
Относительная полнота	0,6	
Запас, м ³ /га	224	177
Подрост: вид	Ель европейская	
возраст, лет	25	30
высота, м	2,0	3,0
количество, шт./га	1,5	2,0

Методика проведения работ включала лесоводственно-таксационные ([9, 21], а также ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки») и эколого-биологические [2, 3] методы. При полевых исследованиях 2023 г. в ключевых биотопах выполнен пересчет всех деревьев по породам (элементам леса), фактическим диаметрам и категориям санитарного состояния (жизнеспособности). Категории жизненного состояния деревьев устанавливались в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 09.12.2020 № 2047 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах». Учет сухостойных и выпавших деревьев (валежа) проводился отдельно. Оценка подроста и подлеска осуществлялась по породам, жизненному состоянию и категориям крупности с принятием во внимание приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29.12.2021 № 1024 «Об утверждении Правил лесовосстановления...». При описании почвы и ботанического состава живого напочвенного покрова обращались к публикациям [11, 14]. Напочвенный покров рассматривался по ярусам, для каждого из которых указывалось общее проективное покрытие, обилие отдельных растений по шкале О. Друде на 11–15 учетных площадках размером 1×1 м в ядре и в буферной зоне ключевого биотопа. Также разнообразие видов растений исследовалось на прилегающих к ключевым биотопам территориях – на вырубке и в древостое. Координаты расположения ключевого биотопа и его элементов определяли GPS-навигатором, протяженность границ – геодезической мерной лентой, величину углов – буссолью. Результаты измерений в последующем использовались для подготовки абриса участка с естественными границами ядра биотопа, буферной зоны, а также с границами заложенной пробной площади. Абрис участка составлялся в программе «Абрис+».

В камеральных условиях на основании полученных полевых материалов выполнялся расчет лесоводственно-таксационных показателей древостоя, коэффициентов общности (индекс Жаккара) и видового сходства (индекс Серенсена) по числу встречающихся видов растений [17]. Санитарное состояние ключевого местообитания определялось как средневзвешенная категория санитарного состояния деревьев каждой древесной породы. При обработке полученных данных также применялись методы математической статистики [4, 16].

Результаты исследования и их обсуждение

Средние таксационные показатели древостоя, полученные на основании детального обследования ключевых биотопов, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Таксационная характеристика древостоя в ключевых биотопах
The taxation characteristics of the stands in the key biotopes

Объект	Площадь биотопа, га	Состав древостоя	Число стволов, шт./га	Средние			Полнога	Бонитет	Запас древесины, м ³ /га
				возраст, лет	диаметр, см	высота, м			
Кубено-Озерский	1,3	6Б	65	81	36,1	27,5	0,21	I	80
		2Е	116		21,4	16,5	0,14		34
		2Ос	11		51,7	27,7	0,06		28
		Ед. Ол _с	23	15,6	11,0	0,02	2		
		Ед. Лп	3	18,9	15,0	0,003	1		
		<i>Итого</i>	218	–	–	–	0,43	–	145
Новленское	1,5	5Е	410	89	22,9	19,6	0,47	IV	160
		3С	50		40,6	26,0	0,15		77
		2Б	155		26,3	20,3	0,32		75
		+Ол _с	35	18,4	13,6	0,04	6		
		<i>Итого в 1-м ярусе</i>	650	–	–	–	0,98	–	318
		10Е	630	–	–	–	0,39	–	48
+Ол _с	20	–	–	–	0,01	–	1		
<i>Итого во 2-м ярусе</i>	650	–	–	–	0,40	–	49		

В ключевом биотопе стационара «Кубено-Озерский» произрастает среднеполнотный древостой с преобладанием березы в породном составе. На вырубке и в буферной зоне почва среднеподзолистая супесчаная, подстилаемая суглинком, в ядре биотопа – аллювиальная, гумусированная, суглинистая. Лесорастительные условия на объекте различаются по зонам: в зоне вырубки – таволговый тип лесорастительных условий, в переходной зоне – разнотравный, в ядре биотопа – приручейный.

В ключевом биотопе стационара «Новленское» древостой представлен преимущественно хвойными породами (ель, сосна), имеет высокие полноту и запас растущей здоровой древесины. Почвы прилегающих к ядру биотопа древостоя, вырубки и буферной зоны – среднеподзолистые супесчаные, подстилаемые суглинком. В ядре биотопа почва аллювиальная, гумусированная, суглинистая. Лесорастительные условия на объекте различаются по зонам: в зоне вырубки – черничный тип, в буферной зоне – разнотравный, в ядре биотопа – приручейный.

Разнообразие древесных растений в ключевых биотопах характеризуется преимущественно аборигенными таежными видами – елью европейской (*Picea abies* (L.) Н. Karst.), сосной обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), березой пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) и осиной обыкновенной (*Populus tremula* L.). Следует отметить, что видов древесных растений в ключевых биотопах больше, чем на лесосеке в целом. В ключевых биотопах дополнительно встречается ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench). На стационаре «Кубено-Озерский» в составе древостоя в границах биотопа также произрастает липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill) – северная граница ареала вида.

В ключевых биотопах отмечен значительный объем сухостойной и валежной древесины, достигающий на участках 82 и 111 м³/га соответственно. Сухостой и валеж являются естественной средой обитания для многих видов грибов, насекомых и птиц [5, 20]. Объем сухостойной древесины в прилегающих к биотопам древостоях не превышает 34 м³/га, валежная древесина отсутствует. Большое количество сухостойной древесины и валежа в ключевых биотопах, вероятно, объясняется особыми гидрологическими условиями и ветровальным воздействием на небольших по площади участках (1,3 и 1,5 га) среди сплошной вырубки.

На момент проведения исследования средневзвешенный показатель категории санитарного состояния насаждений составил 2,80 для биотопа «Кубено-Озерский» и 2,74 – для биотопа «Новленское», что характеризует древостой как сильно ослабленные.

В подросте и подлеске в ключевых биотопах также произрастают таежные лесные виды древесно-кустарниковой растительности. Кроме того, на участке «Новленское» встречаются свойственные для зоны широколиственных лесов виды – клен остролистный (*Acer platanoides* L.) и дуб черешчатый (*Quercus robur* L.).

В живом напочвенном покрове на участке «Кубено-Озерский» отмечено 22 вида растений. Среди них преобладают таволга вязолистная (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., Cop³), страусник обыкновенный (*Matteuccia struthiopteris* (L.) Tod., Cop²), черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L., Cop²), плеуроциум Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt., Cop²). На участке

«Новленское» в живом напочвенном покрове зафиксировано 34 вида растений, преобладающими из которых являются осока пузырчатая (*Carex vesicaria* L., Cop^2), черника обыкновенная (Cop^2) и плагиохила (*Plagiochila asplenoides* (L. emend. Taylor) Dumort., Cop^2). В живом напочвенном покрове ключевых биотопов среднее число видов растений превышает их количество на прилегающей вырубке и в примыкающем древостое (табл. 3).

Таблица 3

Численность видов растений живого напочвенного покрова в ключевых биотопах и на прилегающих участках
The number of plant species of the live ground cover in the key biotopes and adjacent areas

Объект	Среднее число видов растений на учетных площадках с основной ошибкой		
	Лесосека		Древостой
	Ключевой биотоп	Вырубка	
Кубено-Озерский	10±0,4	9±0,2	Нет данных
Новленское	10±0,2	6±0,6	8±0,2

Достоверность различий между средним числом видов растений в ключевом биотопе стационара «Новленское» и на вырубке, а также в этом биотопе и смежном древостое доказана на всех уровнях доверительной вероятности ($t \geq 6,3$ при $t_{0,999} = 3,5$). Различие среднего числа видов в ключевом биотопе стационара «Кубено-Озерский» и на прилегающей вырубке не является статистически достоверным.

Индекс общности Жаккара составляет 0,22 (биотоп–древостой) и 0,26 (биотоп–вырубка), что указывает на незначительную общность видов растений на рассматриваемых территориях. Индекс видовой схожести Серенсена равняется соответственно 0,47 и 0,50, что свидетельствует о средней степени видовой флористического сходства в ключевых биотопах и на примыкающих участках.

Следует также отметить, что в границах ключевых биотопов обнаружены редкие (лобария легочная *Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm, камыш укореняющийся *Scirpus radicans* Schkuhr) и уязвимые (некера перистая *Neckera pennata* Hedw.) виды растений, занесенные в Красную книгу Вологодской области [8].

Приведенные результаты подтверждают более высокий уровень видовой разнообразия в ключевых биотопах в сравнении с примыкающим древостоем и вырубкой, что объясняется экотонным (краевым, или приграничным) эффектом, заключающимся в увеличении видовой разнообразия в переходной зоне между двумя биологическими сообществами, где виды встречаются и интегрируются [7]. Похожие результаты были получены в ходе реализации проекта «Псковский модельный лес», в ходе которого сравнивалось биоразнообразие на «экспериментальной» (с сохранением сходных типов ключевых биотопов) и «фоновой» (выполненной по традиционным технологиям, без сохранения ключевых биотопов) вырубках через 6 лет после рубки. Результаты исследования показали, что на вырубке с оставлением ключевых биотопов сохраняется

существенно больше видов растений [1, 5, 25]. Это свидетельствует о лесоводственно-экологической и природоохранной ценности исследуемых ключевых биотопов. Наличие значительного количества видов в ключевых биотопах в сравнении с прилегающими территориями (вырубка и древостой) подтверждает необходимость оставления нетронутыми объектов биологического разнообразия в ходе лесозаготовительных работ.

Отмечено, что видовое разнообразие растений различается в центральной (ядро) и периферийной (буферная зона) частях биотопов (табл. 4). При этом естественная граница ядра биотопа и его буферной зоны визуальнo четко различима.

Таблица 4

Численность видов растений живого напочвенного покрова в ядре и буферной зоне ключевых биотопов

The number of plant species of the live ground cover in the core and buffer zone of the key biotopes

Объект	Среднее число видов растений на учетных площадках с основной ошибкой	
	Ядро биотопа	Буферная зона
Кубено-Озерский	5±0,3	10±0,4
Новленское	7±0,4	

Среднее число видов растений в буферной зоне стационара «Кубено-Озерское» в 2,1 раза, а стационара «Новленское» – в 1,5 раза превышает число видов в ядре ключевого биотопа. Достоверность различий между средним количеством растений в ядре и буферной зоне биотопа доказана на всех уровнях доверительной вероятности ($t \geq 8,2$ при $t_{0,999} = 3,5$).

Следует отметить, что виды, занесенные в Красную книгу Вологодской области [2], а также редкие для региона древесные растения обнаружены в буферной зоне ключевых биотопов. Этот и приведенные выше факты свидетельствуют о необходимости выделения ядра ключевого биотопа и буферной зоны вокруг него, что подтверждается результатами других исследований [23, 24].

Заключение

Полученные нами данные указывают на важность сохранения биологического разнообразия на различных уровнях с учетом требований действующего национального законодательства.

Наличие большего числа видов растений в ключевых биотопах в сравнении с прилегающими территориями (вырубка и древостой) подтверждает необходимость сохранения ключевых биотопов в ходе лесозаготовительных работ.

Помимо выделения центральной зоны, примыкающей непосредственно к водотоку (ядро биотопа), требуется дополнительно сохранять буферную зону как территорию с наибольшей численностью видов. Выделение буферной зоны ключевого биотопа должно осуществляться по ее естественным ландшафтными границам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андреева С.В., Бубличенко А.Г., Бубличенко Ю.Н., Загидуллина А.Т., Глушкова Н.Б., Книзе А.А., Коткова В.М., Кушневская Е.В., Мосягина Е.В., Носова Е.А., Рождественский С.Ю. Результаты исследований биологического разнообразия на территории Псковского модельного леса. СПб., 2010. 112 с.
Andreeva S.V., Bublichenko A.G., Bublichenko Yu.N., Zagidullina A.T., Glushkovskaya N.B., Knieze A.A., Kotkova V.M., Kushnevskaya E.V., Mosyagina E.V., Nosova E.A., Rozhdestvenskiy S.Yu. *The Results of the Studies of Biological Diversity on the territory of the Pskov Model Forest*. St. Petersburg, 2010. 112 p. (In Russ.).
2. Водоросли, лишайники и мохообразные СССР / отв. ред. М.В. Горленко. М.: Мысль, 1978. 365 с.
Algae, Lichens and Bryophytes of the USSR. Ed.-in-chief M.V. Gorlenko. Moscow, Mysl' Publ., 1978. 365 p. (In Russ.).
3. Выявление и обследование биологически ценных лесов на северо-западе европейской части России. Т. 2. Пособие по определению видов, используемых при обследовании на уровне выделов / под ред. Л. Андерссон, Н.М. Алексеева, Е.С. Кузнецова. СПб., 2009. 258 с.
Identification and Survey of Biologically Valuable Forests in the North-West of the European Part of Russia. Vol. 2: a Guide to Identifying Species Used in Unit-Level Surveys. Ed. by L. Andersson, N.M. Alekseev, E.S. Kuznetsov. St. Petersburg, 2009. 258 p. (In Russ.).
4. Гусев И.И. Моделирование экосистем. Архангельск: АГТУ, 2002. 112 с.
Gusev I.I. *Ecosystem Modelling*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 112 p. (In Russ.).
5. Карпачевский М.Л., Тепляков В.К., Яницкая Т.О., Ярошенко А.Ю., Брюханов А.В., Букварева Е.Н., Конюшатов О.А., Корчагов С.А., Кулясова А.А., Петров А.П., Рай Е.А. Основы устойчивого лесопользования. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2014. 266 с.
Karpachevskiy M.L., Teplyakov V.K., Yanitskaya T.O., Yaroshenko A.Yu., Bryukhanov A.V., Bukvareva E.N., Konyushatov O.A., Korchagov S.A., Kulyasova A.A., Petrov A.P., Rai E.A. *Fundamentals of Sustainable Forest Management*. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, 2014. 266 p. (In Russ.).
6. Конюшатов О.А., Корчагов С.А., Грибов С.Е., Беляков Д.В. Нормативно-правовая база в области сохранения биологического разнообразия при лесопользовании // Актуальные вопросы таежного и притундрового лесоводства на Европейском Севере России: Материалы науч.-практ. конф., Архангельск, 23–24 нояб. 2023 г. Архангельск: СевНИИЛХ, 2023. С. 337–344.
Konyushatov O.A., Korchagov S.A., Gribov S.E., Belyakov D.V. Regulatory Framework in the Field of Conservation of Biological Diversity in Forest Management. *Current Issues of Taiga and Tundra Forestry in the European North of Russia: Materials of the Scientific and Practical Conference* (Arkhangelsk, November 23–24, 2023). Arkhangelsk, Northern Research Institute of Forestry, 2023, pp. 337–344. (In Russ.).
7. Корляков К.А. Основные положения теории экотонных экосистем // Вестн. Совета молодых ученых и специалистов Челябин. обл. 2019. Т. 1, № 4(27). С. 3–10.
Korlyakov K.A. Basic Provisions of the Theory of Ecotone Ecosystems. *Vestnik Soveta molodykh uchenykh i spetsialistov Chelyabinskoy oblasti*, 2019, vol. 1, no. 4(27), pp. 3–10. (In Russ.).
8. Красная книга Вологодской области. Т. 2. Растения и грибы / отв. ред. Г.Ю. Конечная, Т.А. Сулова. Вологда: ВГПУ, Русь, 2004. 360 с.
The Red Book of the Vologda Region. Vol. 2: Plants and Mushrooms. Eds.-in-chief G.Yu. Konechnaya, T.A. Suslova. Vologda, VSPU, Rus' Publ. 2004. 360 p. (In Russ.).
9. Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 408 с.

Melekhov I.S. *Forest Science*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 408 p. (In Russ.).

10. Методические рекомендации по сохранению биологического разнообразия при заготовке древесины в Вологодской области. Вологда, 2014. 21 с.

Instructional Guidelines for Biodiversity Conservation during Logging in the Vologda Region. Vologda, 2014. 21 p. (In Russ.).

11. Наквасина Е.Н., Серый В.С., Семенов Б.А. Полевой практикум по почвоведению. Архангельск: АГТУ, 2007. 127 с.

Nakvasina E.N., Seryj V.S., Semenov B.A. *Field Practicum on Soil Science*. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 127 p. (In Russ.).

12. Национальная Стратегия сохранения биоразнообразия России / Рос. акад. наук, М-во природ. ресурсов Рос. Федерации. М., 2001. 76 с.

National Strategy for Biodiversity Conservation in Russia. Moscow, Russian Academy of Sciences, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 2001. 76 p. (In Russ.).

13. Немчинова А.В. Правовая обеспеченность сохранения биологического разнообразия в эксплуатационных лесах в федеральной и региональной нормативно-правовой базе и гармонизация российского законодательства с требованиями FSC // Интенсивное устойчивое лесное хозяйство: барьеры и перспективы развития: сб. ст. / под общ. ред. Н. Шматкова. М., 2013. С. 149–182.

Nemchinova A.V. Legal Support for the Conservation of Biological Diversity in Commercial Forests in the Federal and Regional Regulatory Framework and Harmonization of Russian Legislation with FSC Requirements. *Intensive Sustainable Forestry: Barriers and Development Prospects: Collection of Articles*. Ed. by N. Shmatkov. Moscow, 2013, pp. 149–182. (In Russ.).

14. Орлова Н.И. Определитель высших растений Вологодской области. Вологда: ВГПУ, Русь, 1997. 264 с.

Orlova N.I. *Determinant of Higher Plants of the Vologda Oblast*. Vologda, VSPU, Rus' Publ., 1997. 264 p. (In Russ.).

15. Паутов Ю.А., Конюшатов О.А., Яницкая Т.О. К практике сохранения биологического разнообразия при лесосечных работах // Устойчивое лесопользование. 2010. № 1(23). С. 22–27.

Pautov Yu.A., Konyushatov O.A., Yanitskaya T.O. On the Practice of Preserving Biological Diversity during Logging Operations. *Ustojchivoe lesopol'zovanie = Sustainable Forestry*, 2010, no. 1(23), pp. 22–27. (In Russ.).

16. Простейшие методы статистической обработки результатов экологических исследований / сост. А.С. Боголюбов. М.: Экосистема, 1998. 10 с.

The Simplest Methods of Statistical Processing of the Results of Environmental Studies. Comp. by A.S. Bogolyubov. Moscow, Ekosistema Publ., 1998. 10 p. (In Russ.).

17. Шайхутдинова А.А. Методы оценки биоразнообразия: метод. указания / Оренбург. гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2019. 37 с.

Shaikhutdinova A.A. *Methods of Biodiversity Assessment: Methodical Guidelines*. Orenburg State University. Orenburg, OSU Publ., 2019. 37 p. (In Russ.).

18. Hansson L. Key Habitats in Swedish Managed Forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2001, vol. 16, supp. no. 003, pp. 52–61. <https://doi.org/10.1080/028275801300090609>

19. Hämäläinen K., Tahvanainen T., Junninen K. Characteristics of Boreal and Hemiboreal Herb-Rich Forests as Habitats for Polypore Fungi. *Silva Fennica*, 2018, vol. 52, no. 5, art. no. 10001. <https://doi.org/10.14214/sf.10001>

20. Lilja S., Wallenius T., Kuuluvainen T. Structure and Development of Old *Picea abies* Forests in Northern Boreal Fennoscandia. *Écoscience*, 2006, vol. 13, iss. 2, pp. 181–192. <https://doi.org/10.2980/i1195-6860-13-2-181.1>

21. Maltamo M. What Does it Actually Mean to Measure a Sample Plot in Forest? *Silva Fennica*, 2023, vol. 56, no. 4, art. no. 23005. <https://doi.org/10.14214/sf.23005>
22. Nirhamo A., Pykälä J., Jääskeläinen K., Kouki J. Habitat Associations of Red-Listed Epiphytic Lichens in Finland. *Silva Fennica*, 2023, vol. 57, no. 1, art. no. 22019. <https://doi.org/10.14214/sf.22019>
23. Oldén A., Selonen V.A.O., Lehtonen E., Kotiaho J.S. The Effect of Buffer Strip Width and Selective Logging on Streamside Plant Communities. *BMC Ecology*, 2019, vol. 19, art. no. 9. <https://doi.org/10.1186/s12898-019-0225-0>
24. Ring E., Johansson F., Brömssen von C., Bergkvist I. A Snapshot of Forest Buffers near Streams, Ditches, and Lakes on Forest Land in Sweden – Lessons Learned. *Silva Fennica*, 2022, vol. 56, no. 4, art. no. 10676. <https://doi.org/10.14214/sf.10676>
25. Rydgren B., Kyläkorpi L., Bodlund B., Ellegård A., Grusell E., Miliander S. Experiences from Five Years of Using the Biotope Method, a Tool for Quantitative Biodiversity Impact Assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2005, vol. 23, iss. 1, pp. 47–54. <https://doi.org/10.3152/147154605781765760>
26. Sverdrup-Thygeson A. Key Habitats in the Norwegian Production Forest: a Case Study. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2002, vol. 17, iss. 2, pp. 166–178. <https://doi.org/10.1080/028275802753626818>

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

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

Научная статья

УДК 674.816.2:674.038.4

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-201-215

Водопоглощение термически модифицированного древесного наполнителя термодревесно-цементной композиции

В.Ю. Чернов¹, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [X-4439-2019](https://orcid.org/0000-0001-9496-7340),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

И.Г. Гайсин¹, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [AAH-8298-2020](https://orcid.org/0000-0002-3707-1342),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3707-1342>

А.Н. Носова¹, аспирант; *ResearcherID*: [JQW-3871-2023](https://orcid.org/0009-0009-9788-9929),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9788-9929>

Е.М. Мальцева², директор; *ResearcherID*: [JQW-0124-2023](https://orcid.org/0009-0004-4868-8294),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4868-8294>

¹Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия, 424000; chernovvy@volgatech.net, GaisinIG@volgatech.net, NosovaAN79@mail.ru

²ООО «КСМ «Амарант», ул. Димитрова, д. 75, г. Йошкар-Ола, Россия, 424039; lenkamalek@mail.ru

Поступила в редакцию 14.09.23 / Одобрена после рецензирования 13.12.23 / Принята к печати 15.12.23

Аннотация. Рассматриваются технологические аспекты получения нового эффективного композиционного материала на основе термически модифицированного древесного наполнителя и цементных вяжущих веществ – термодревбетона. Исследовано влияние содержания воды в наполнителе из термически модифицированной древесины на качественные показатели древесно-цементной композиции. Для решения теоретических задач и прикладных вопросов прогнозирования технологических параметров производства термодревесно-цементной композиции разработаны математические модели влияния продолжительности вымачивания и температуры воды на относительное изменение массы (увлажнение) наполнителя. На начальном этапе были выполнены экспериментальные исследования по определению воздействия предварительного вымачивания наполнителя на процесс созревания термодревбетона и качество получаемого материала. Образцы изготавливались способом вибропрессования полусухой смеси с использованием сухого и предварительно вымоченного наполнителя из термически модифицированной древесины, а также способом вибролитья. Определены закономерности влагопереноса между наполнителем и цементно-песчаным раствором, а также установлено, что предварительное вымачивание наполнителя из термически модифицированной древесины оказывает положительное влияние на прочностные и качественные показатели термодревбетона. Наоборот, использование сухого наполнителя из термически модифицированной древесины при данном способе формирования оказывает существенное отрицательное влияние на качество готового материала. Отдельно был исследован процесс влагопоглощения наполнителем из термически модифицированной древесины путем вымачивания, установлены основные закономерности и особенности сорбции воды наполнителем с интервалами времени 30, 60, 120, 180 и 300 мин и при температуре воды 3–4, 16–18 и 75–85 °С. Также определено, что дополнительный прогрев воды значительно ускоряет интенсивность сорбции воды и степень увлажне-

ния заполнителей из термически модифицированной древесины, а размер их частиц не играет существенной роли в процессе. При этом рекомендуемая продолжительность вымачивания заполнителя из термически модифицированной древесины перед подготовкой смеси и формованием изделий из термодревбетона методом полусухого вибропрессования составляет 30 мин.

Ключевые слова: термически модифицированная древесина, ТМД, влажность термически модифицированной древесины, вымачивание заполнителя из термически модифицированной древесины, термодревесно-цементная композиция, вибропрессование полусухой термодревесно-цементной композиции, термодревбетон, ТДБ

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00098, <https://rscf.ru/project/22-79-00098/>.

Для цитирования: Чернов В.Ю., Гайсин И.Г., Носова А.Н., Мальцева Е.М. Водопоглощение термически модифицированного древесного заполнителя термодревесно-цементной композиции // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 2. С. 201–215. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-201-215>

Original article

Water Absorption of Thermally Modified Wood Filler of Thermal Wood-Cement Composition

Vasily Yu. Chernov¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [X-4439-2019](https://orcid.org/0000-0001-9496-7340), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-7340>

I'shat G. Gaisin¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAH-8298-2020](https://orcid.org/0000-0002-3707-1342),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3707-1342>

Anzhelika N. Nosova¹, Postgraduate Student; ResearcherID: [JQW-3871-2023](https://orcid.org/0009-0009-9788-9929),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9788-9929>

Elena M. Maltseva², Chief Executive Officer; ResearcherID: [JQW-0124-2023](https://orcid.org/0009-0004-4868-8294),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4868-8294>

¹Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation; chernovvy@volgatech.net, GaisinIG@volgatech.net, NosovaAN79@mail.ru

²LLC “СМР “AMARANT”, ul. Dimitrova, 75, Yoshkar-Ola, 424039, Russian Federation; lenkamalek@mail.ru

Received on September 14, 2023 / Approved after reviewing on December 13, 2023 / Accepted on December 15, 2023

Abstract. In this article, the technological aspects of obtaining a new effective composite material based on thermally modified wood filler and cement binders – thermal wood concrete – are considered. The influence of water content in thermally modified wood filler on the qualitative characteristics of a wood-cement composition has been studied. To solve the theoretical problems and applied issues of forecasting the technological parameters for the production of thermal wood-cement composition, the mathematical models of the effect of soaking duration and water temperature on the relative change in the mass (dampening) of the filler have been developed. At the initial stage, experimental studies have been carried out to determine the effect of pre-soaking the filler on the curing of thermal wood concrete and the quality of the resulting material. The samples have been produced via vibrocompression of a semi-dry mixture using dry and pre-soaked filler made of thermally modified wood, as well as via vibratory casting. The regularities of moisture transfer between the filler and the



cement-sand mortar have been determined, and it has also been established that pre-soaking the thermally modified filler has a positive effect on the strength and quality characteristics of thermal wood concrete. On the contrary, the use of the dry filler made of thermally modified wood in this molding method has a significant negative impact on the quality of the finished material. The process of moisture absorption by the thermally modified wood filler by soaking has been studied separately. The main regularities and features of water sorption by the filler have been established at the time intervals of 30, 60, 120, 180 and 300 minutes and at the water temperatures of 3–4, 16–18 and 75–85 °C. It has also been determined that additional water heating significantly accelerates the intensity of water sorption and the degree of dampening of thermally modified wood fillers, and the size of their particles does not play a significant role in the process. In this case, the recommended duration of soaking the thermally modified wood filler before preparing the mixture and molding the products made of thermal wood concrete via semi-dry vibrocompression is 30 minutes.

Keywords: thermally modified wood, TMW, thermally modified wood moisture content, soaking the thermally modified filler, thermal wood-cement composition, vibrocompression of a semi-dry thermal wood-cement composition, thermal wood concrete, TWC

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-79-00098, <https://rscf.ru/project/22-79-00098/>.

For citation: Chernov V.Yu., Gaisin I.G., Nosova A.N., Maltseva E.M. Water Absorption of Thermally Modified Wood Filler of Thermal Wood-Cement Composition. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 2, pp. 201–215. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-2-201-215>

Введение

В настоящее время ведутся разработки по созданию нового эффективного термодревесно-цементного композитного строительного материала, сочетающего в себе преимущества древесины и искусственных камней (бетонов). Такие материалы, как арболит, фибролит, наряду с высокими теплоизоляционными свойствами имеют недостатки, присущие древесине: высокую степень водопоглощения и подверженность грибным поражениям [2, 4, 5, 20]. Водопоглощение отрицательно влияет на прочность, морозостойкость, теплопроводность и другие эксплуатационные свойства готового изделия [27]. Грибные поражения создают небезопасные для человека условия внутри помещений.

Применение в бетонах в качестве органического заполнителя термически модифицированной древесины (ТМД) позволило свести к минимуму риск образования грибка и водопоглощение материала [21]. Также к преимуществам термической модификации следует отнести снижение количества экстрактивных веществ и кислот в древесном заполнителе, являющихся «цементными ядами», уменьшение плотности и повышение теплопроводности [22], что в совокупности существенно улучшает эксплуатационные свойства древесно-цементной композиции [9, 26, 29]. Данный материал впервые был получен на базе научно-производственного объединения «МариТермоДревИндустрия» под авторским названием термодревбетон (ТДБ) [6, 11]. Основная часть поисковых исследований проводится в Поволжском государственном технологическом университете.

Наиболее близкие разработки древесно-цементных композиций с добавлением мелкодисперсных частиц из ТМД были выполнены за рубежом [18, 19, 23–25, 28], а также в России [8, 10]. К сожалению, в указанных источниках не представлены данные о свойствах таких композиций и влиянии на эти свойства различных факторов, о технологических и рецептурных параметрах, а также теоретические расчетные методики.

Для получения высококачественного строительного материала необходимо четкое соблюдение рецептурных требований и общих технологических принципов его получения. При изготовлении материалов на основе гидравлических вяжущих значительное влияние оказывают количественное содержание воды в бетонной смеси, химические добавки, наличие влаги при выдержке материала до набора им проектной прочности. Как нехватка количества воды, так и ее избыток негативно влияют на физико-механические, эксплуатационные и иные свойства готового материала. Это связано с особенностями процесса гидратации цементных вяжущих веществ [1, 15, 16].

В отличие от классических тяжелых бетонов, изготовленных на минеральных природных заполнителях, в древесно-цементных композициях у крупного заполнителя – древесины впитываемость влаги во много раз выше, что усложняет технологию их получения как вибропрессованием, так и вибролитьем. Отличительной особенностью процесса производства арболита и фибролита является подготовка древесного сырья, которая заключается в его выдержке не менее 2 мес. при положительной температуре в целях снижения негативного воздействия экстрактивных веществ. Для улучшения технологических и эксплуатационных свойств в арболитовую смесь вносят химические добавки, ускоряющие твердение, регулирующие пористость, повышающие защитные и бактерицидные свойства и т. д. [5]. Наиболее широкое применение при изготовлении арболита находят такие добавки, как хлорид и нитрат кальция, сернокислый глинозем, жидкое натриевое стекло и др. [13].

Несмотря на то, что ТДБ является древесно-цементной композицией, его ключевая особенность – заполнитель из ТМД, имеющей отличные от натуральной древесины свойства, в т. ч. и по водо- и влагопоглощению. У ТМД также более низкая равновесная влажность: при стандартных условиях среды (температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 65 %) влажность натуральной древесины составляет около 12 % [14], ТМД – примерно 2–4 % [17]. Это усредненные показатели, которые зависят от породы древесины, степени (класса) термической модификации и т. д.

Ранее нами проведены исследования адгезии цементно-песчаного раствора и ТМД [12], а также прочностных и теплопроводных свойств ТДБ. Установлены взаимно-противоположные закономерности влияния содержания воды в бетонной смеси и отдельно в заполнителе из ТМД на свойства композиции. Поверхностное очищение ТМД путем промывания от продуктов термической модификации, сопровождающееся ее увлажнением, а на практике и вымачиванием, негативно действует на прочность сцепления ТМД и цементно-песчаного раствора. Обнаруженные закономерности легли в основу способа изготовления ТДБ [6]. Однако на практике сухой заполнитель из ТМД

оказался непригодным для получения ТДБ методом вибропрессования полусухой смеси [3, 12].

Цель работы – исследование процесса увлажнения заполнителя из ТМД и влияния его влажности на качество ТДБ, полученного способом полусухого формования.

Объекты и методы исследования

Полусухое формование ТДБ. Несмотря на то, что ТМД обладает пониженным водопоглощением по сравнению с натуральной древесиной, применяемой в классических древесно-цементных композициях (арболит, фибролит и т. д.), для получения качественного материала, а именно бетонов, необходимо рассмотреть непосредственно процесс гидратации (созревания и набора прочности) термодревесно-цементной композиции. Как уже было отмечено, повышенное содержание влаги негативно влияет на адгезионные свойства ТМД и цементного камня. С другой стороны, недостаток влаги оказывает существенное воздействие на марочную прочность получаемого бетона. Поэтому в ходе исследования была разработана упрощенная методика, заключающаяся в визуальном анализе образцов, изготовленных по следующим рецептурам:

группа 1-1 – ТДБ, полученный вибропрессованием полусухой смеси с применением заполнителя из ТМД, предварительно вымоченного посредством обильной промывки;

группа 2-1 – ТДБ, спрессованный аналогично группе 1-1, только с использованием заполнителя из ТМД в сухом состоянии;

группа 3-1 – ТДБ, изготовленный способом вибролитья, заполнитель из ТМД также в сухом состоянии.

Третья группа образцов применялась для выявления сходства или различия между композициями, полученными методами вибропрессования и вибролитья.

Процесс созревания (выдержки) ТДБ осуществлялся при стандартных условиях среды без дополнительной тепловлажностной обработки. Образцы изготавливались в виде кубов размерами 100×100×100 мм. Наблюдение выполнялось до момента высыхания образца, что определялось по изменению его цвета от темного к светло-серому. В связи с тем, что после высыхания бетонных смесей на цементном вяжущем процесс гидратации существенно замедляется, этот период времени был принят в исследовании за время созревания ТДБ.

Водопоглощение заполнителя из ТМД. Были подготовлены частицы заполнителя из ТМД лиственных пород *Tilia europaea* и *Populus tremula* с классом (режимами) обработки КОЛОР+ по технологии AST (185 °С) [3]. Заполнитель имеет вид наклонного параллелепипеда с длиной 10–20 мм, шириной 5–20 мм и толщиной 2–5 мм (рис. 1). Измельчение до заданных размеров и форм термической модификации осуществлялось на специально разработанной установке [7]. Также рассчитана насыпная плотность, которая составила 180–190 кг/м³. Влажность заполнителя – 2–4 %.



Рис. 1. Заполнитель из ТМД для получения ТДБ
Fig. 1. The TMW filler for producing TWC

Влажность заполнителя из ТМД определена весовым методом. Масса – с помощью лабораторных весов с точностью 0,001 г. В качестве варьируемых факторов были приняты продолжительность вымачивания в воде, ее температура и размер частиц заполнителя. По сравнению со стандартным методом установления влажности также изменены продолжительность насыщения образцов, периодичность измерений, размеры образцов и температура. Это обусловлено тем, что данные факторы на практике могут изменяться в широких пределах и оказывают существенное влияние на водопоглощение как обычной древесины, так и ТМД, что, в свою очередь, воздействует на набор прочности ТДБ после формования и на эксплуатационные свойства получаемых изделий. В исследовании использовалась техническая вода по ГОСТ 23732–2011.

Вымачивание заполнителя в виде щепы из ТМД выполнялось в воде при различных температурах (табл. 1). Для определения влияния размера щепы на водопоглощение отдельно подготовлена 4-я группа образцов, отличающихся более мелкими размерами частиц заполнителя.

Таблица 1

Описание условий подготовки исследованных образцов по группам
The description of the studied sample preparation conditions by groups

Группа	Описание	Условия подготовки образцов	Обоснование
1-2	Измельченный заполнитель из ТМД со средними технологически установленными размерами:	Вымачивание в холодной воде температурой 3–4 °С	Температура воды, поступающей непосредственно из подземных источников (скважины, колодцы и т. д.), характерных для производственных процессов получения бетонов
2-2	длина – 15 мм;		
3-2	ширина – 12 мм; толщина – 3 мм	Вымачивание в горячей воде температурой 75–85 °С	Температура, полученная при дополнительном прогреве
4-2	Мелкий измельченный заполнитель из ТМД с размерами: длина – 10 мм; ширина – 5 мм; толщина – 2 мм	Аналогично группе 1-2	

Взвешивание щепы осуществлялось на 30, 60, 120, 180 и 300-й минутах вымачивания. Такой интервал времени выбран с учетом общей закономерности влагопоглощения древесины, которая характеризуется быстрой сорбцией воды в начале увлажнения от состояния, близкого к абсолютно сухому, и последующим снижением интенсивности увлажнения с повышением влажности древесины.

Результаты исследования и их обсуждение

Влияние рецептуры и способа формования на качество ТДБ. На рис. 2 и 3 представлены внешний вид поверхности и целостность ребер образцов из термодревесно-цементной композиции трех групп.



группа 1-1

группа 2-1

Рис. 2. Поверхности и ребра образцов ТДБ, полученных способом полусухого вибропрессования с использованием предварительно вымоченного (слева) и сухого (справа) заполнителя из ТМД

Fig. 2. The surfaces and edges of the TWC samples obtained via semi-dry vibrocompression using the pre-soaked (left) and dry (right) TMW fillers



Рис. 3. Внешняя поверхность (слева) и поперечный срез (справа) образцов ТДБ, полученных способом вибролитья (группа 3-1)

Fig. 3. The outer surface (left) and cross-section (right) of the TWC samples obtained via vibratory casting

В результате исследования опытных образцов из ТДБ и процесса их гидратации было установлено следующее:

1) наихудшее качество имеют образцы ТДБ, полученные способом вибропрессования полусухой смеси с использованием сухого заполнителя из ТМД

(группа 2-1) – рис. 2, справа. Это выражается в сочетании кажущейся твердости с излишней хрупкостью материала, особенно на ребрах и углах образцов. Процесс созревания ТДБ до полного высыхания был коротким и при стандартных условиях среды составил 12–18 ч;

2) период созревания образцов ТДБ, полученных аналогичным (1) способом на вымоченном заполнителе из ТМД (группа 1-1), составил 110–120 ч. При этом качество образцов по прочности было существенно лучше (рис. 2, слева): углы и ребра не разрушались, расположенные на поверхности частицы заполнителя не отделялись при внешнем механическом воздействии, образец оставался целостным;

3) вибролитые образцы на сухом заполнителе из ТМД (группа 3-1) (рис. 3) созревали в течение 180–190 ч. В отличие от вибропресованных данные образцы имели более однородную, плотную и малопустотную структуру.

Водопоглощение заполнителя из ТМД. Результаты исследования водопоглощения заполнителя из ТМД в виде технологической щепы представлены в табл. 2. В ней отдельно показаны массы вымоченных образцов, измеренные через установленные интервалы времени, а также абсолютные (г) и относительные (%) изменения величины по сравнению с начальным состоянием. Поскольку исходное состояние щепы из ТМД было близко к абсолютно сухому, то относительное изменение массы (рис. 4) для приблизительной оценки на практике можно количественно приравнять к влажности древесины.

Таблица 2

**Результаты экспериментального исследования водопоглощения
заполнителя из ТМД**

The results of an experimental study of water absorption by the TMW fillers

Показатель (средняя величина)	Продолжительность выдержки в воде (вымачивания), мин					
	0	30	60	120	180	300
<i>Группа 1-2</i>						
Масса, г	1,147	1,364	1,301	1,256	1,304	1,326
Абсолютное изменение массы, г	–	0,217	0,154	0,109	0,157	0,179
Относительное изменение массы, %	–	19	13	10	14	16
<i>Группа 2-2</i>						
Масса, г	1,501	1,819	1,798	1,854	1,921	2,003
Абсолютное изменение массы, г	–	0,318	0,297	0,353	0,420	0,502
Относительное изменение массы, %	–	21	21	24	28	33
<i>Группа 3-2</i>						
Масса, г	1,116	1,765	2,181	2,405	2,545	2,751
Абсолютное изменение массы, г	–	0,649	1,065	1,275	1,429	1,635
Относительное изменение массы, %	–	58	95	116	128	147
<i>Группа 4-2</i>						
Масса, г	0,693	0,802	0,796	0,820	0,850	0,872
Абсолютное изменение массы, г	–	0,109	0,103	0,127	0,157	0,179
Относительное изменение массы, %	–	16	15	18	23	26

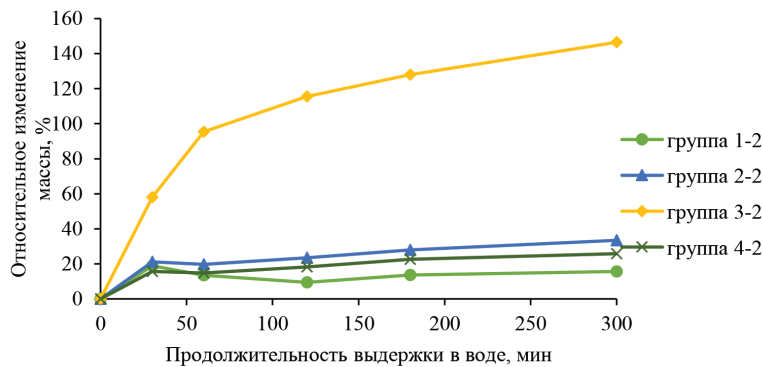


Рис. 4. Динамика относительного изменения средней массы заполнителей из ТМД при вымачивании в воде

Fig. 4. The dynamics of the relative change in the average mass of the TMW fillers when soaked in water

Рецептура и способ формования ТДБ. Исследование опытных образцов из ТДБ, полученных при разных рецептуре и способе формования, показало, что, несмотря на отрицательное влияние на прочность адгезии термодревесно-цементной композиции, увлажнение заполнителя из ТМД имеет более значимое положительное воздействие на прочность всей композиции. Это связано с необходимостью определенного количества воды для гидратации цементного вяжущего на протяжении всего периода созревания (выдержки) с учетом различных факторов потери влаги.

Равновесная влажность ТМД небольшая и составляет порядка 2–4 %, поэтому при замешивании полусухого цементно-песчаного раствора и последующих формовании и выдержке происходит естественный процесс переноса влаги от влагонасыщенного раствора к сухому заполнителю из ТМД. Это подтверждают и ранние исследования, в которых было установлено, что поверхностные слои ТМД, а именно 1–1,5 мм в радиальном и тангенциальном направлениях и до 4 мм вдоль волокон, имеют высокую степень сорбции воды, равную водопоглощению натуральной древесины [6, 11]. В связи с этим цементно-песчаный раствор после замешивания начинает быстро терять влагу, процесс гидратации замедляется и останавливается за более короткий промежуток времени. Как следствие, композиция затвердевает, но не набирает прочности и становится похожей на «песочное печенье», т. е. при ощутимой твердости имеет высокую хрупкость и поэтому не выдерживает даже малые ударные нагрузки.

Перенос влаги от раствора к заполнителю из ТМД подтверждает и тот факт, что образцы ТМД после высыхания разбухают на 1,5–2 мм на каждые 100 мм длины, или на 1,5–2 %, с образованием трещин на поверхности (рис. 5).

Обратный процесс наблюдается при предварительном вымачивании заполнителя из ТМД: излишняя влага переходит от заполнителя к цементно-песчаному раствору. Это предположение подтверждается заметным в 1-й час выдержки повышением влажности цементно-песчаного раствора относительно первоначального состояния, полученного для формования.



Рис. 5. Трещины от разбухания заполнителя из ТМД на поверхности перегородок пустотелого стенового блока из ТДБ

Fig. 5. The cracks due to swelling of the TMW filler on the surface of the partitions of the TWC hollow wall block

К положительной стороне предварительного вымачивания также следует отнести сохранение исходного размера образца, соответствующего форме и размерам самой матрицы. При этом на поверхности ТДБ не образовывались трещины от разбухания.

Как уже было сказано, структура ТДБ, полученного вибролитьем, однороднее и плотнее благодаря более жидкому и пластичному состоянию цементно-песчаного раствора. Следует предположить, что такая структура характеризуется более высокими прочностными и морозостойкими свойствами, однако вследствие меньшей пористости имеет худшие теплофизические свойства. Как показал эксперимент, на практике при вибролитье использование сухого или вымоченного заполнителя из ТМД не оказывает существенного влияния на получаемый материал, однако после замешивания смеси ТДБ в процессе формирования благодаря высокой интенсивности сорбции воды сухой ТМД возможно снижение пластичности смеси, что может негативно повлиять на однородность и плотность получаемого материала.

Водопоглощение заполнителя из ТМД. Полученные экспериментальные зависимости водопоглощения заполнителей из ТМД в виде щепы представляют научно-практический интерес. На основе диаграммы (см. рис. 4) следует выделить главные особенности процесса влагопоглощения:

наибольшая интенсивность естественного водопоглощения в воде без прогрева (группы 1-2, 2-2 и 4-2) наблюдается в течение первых 30 мин;

при вымачивании образцов с 30-й до 60-й минуты, наоборот, происходит стабилизация и приостановка сорбции влаги ТМД (группы 2-2 и 4-2) или незначительное снижение влажности (группа 1-2);

после 120 мин вымачивания отмечается небольшое стабильное повышение влажности заполнителя из ТМД;

наименьшая интенсивность сорбции воды установлена для образцов с одинаковой температурой воды для выдержки (группы 1-2 и 4-2), а с повышением температуры воды интенсивность влагопоглощения увеличивается.

Для прогнозирования изменения массы (водопоглощения) заполнителя из ТМД разработана математическая модель влияния продолжительности выдержки в воде и ее температуры на указанные параметры (рис. 6, а). Модель имеет вид

$$z = (a + bx + cx^2 + dy)/(1 + ey),$$

где z – выходной фактор; a, b, c, d, e – коэффициенты математической модели; x, y – варьируемые факторы.

Поскольку в технологических процессах получения ТДБ и изделий из него актуальна интенсификация подготовки сырья и производства готового материала, а также экспериментально установлена высокая интенсивность сорбции воды в начальный момент времени, на практике интерес может представлять разработка модели набора влаги наполнителем из ТМД в первые 30 мин при разных температурах воды (рис. 6, б). С точки зрения практического использования данную модель целесообразно представить в упрощенном виде, например в виде линейной зависимости:

$$z = a + bx + cy.$$

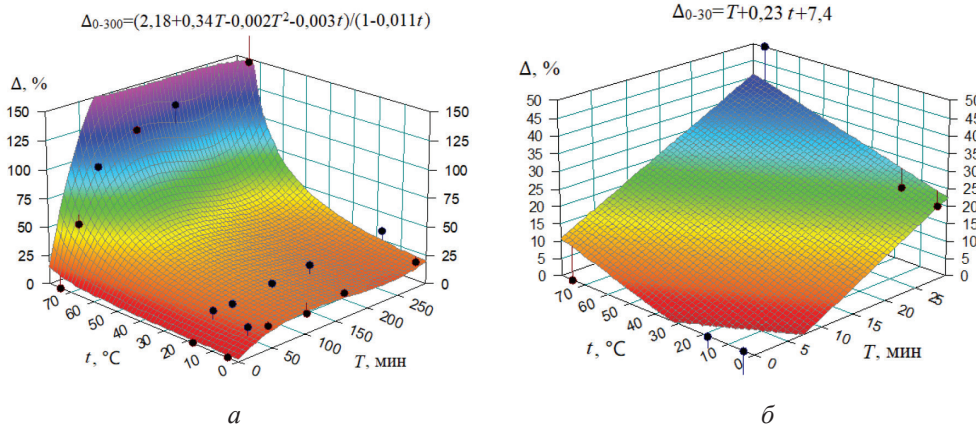


Рис. 6. Модели и поверхности отклика влияния продолжительности выдержки в воде и ее температуры на относительное изменение массы (увлажнения) наполнителя из ТМД для диапазона продолжительности выдержки: а – от 0 до 300 мин; б – от 0 до 30 мин (Δ_{0-300} и Δ_{0-30} – относительное изменение массы (увлажнение) наполнителя из ТМД, %; T – продолжительность выдержки в воде, мин; t – температура воды, °C)

Fig. 6. The models and response surfaces of the effect of soaking duration and water temperature on the relative change in the mass (dampening) of the TMW filler: а – from 0 to 300 min; б – from 0 to 30 min (Δ_{0-300} и Δ_{0-30} – relative change in the mass (dampening) of the TMW filler, %; T – soaking duration, min; t – water temperature, °C)

В табл. 3 представлены показатели регрессионного анализа для разработанных моделей (рис. 6).

Таблица 3

Результаты регрессионного анализа для моделей влияния продолжительности выдержки в воде и ее температуры на свойства наполнителя из ТМД
The results of regression analysis for the models of the effect of water-soaking duration and water temperature on the properties of the TMW filler

Показатель	Диапазон времени, мин	
	0–300	0–30
r^2	0,96	0,84
Скорректированный r^2	0,94	0,61
Остаточная стандартная ошибка, %	11,30	10,10
F-значение	46,85	8,07

Примечание: r^2 – коэффициент детерминации; F-значение – показатель критерия Фишера.

Заключение

Установлено, что предварительное вымачивание заполнителя из термически модифицированной древесины положительно влияет на прочностные и качественные показатели термодревбетона, получаемого способом вибропрессования полусухой термодревесно-цементной композиции.

Разработана модель комплексного влияния температуры воды и продолжительности вымачивания на относительное изменение массы заполнителя из термически модифицированной древесины. В дальнейшем модель послужит основой теоретического определения конечной влажности или продолжительности выдержки в зависимости от температуры воды. Для практического использования результатов исследования предложена упрощенная линейная зависимость, которая позволяет прогнозировать те же показатели в диапазоне времени от 0 до 30 мин.

Рекомендуемая продолжительность вымачивания заполнителя из термически модифицированной древесины перед подготовкой смеси и формованием изделий из термодревбетона методом полусухого вибропрессования составляет 30 мин.

Температура воды оказывает влияние на интенсивность сорбции и степень увлажнения материала в первые 30 мин. Однако при последующем вымачивании при естественных условиях (при температуре воздуха от 0 до 20 °С) наблюдается лишь небольшое непрерывное плавное увеличение массы, объясняемое повышением влажности.

Дополнительный прогрев воды существенно ускоряет интенсивность сорбции воды и степень увлажнения заполнителя из термически модифицированной древесины. Однако данное мероприятие усложняет технологический процесс получения материала, снижает общую производительность и увеличивает затраты на энергию, а перенасыщение влагой может повлечь за собой ухудшение качества получаемых изделий.

Экспериментально установлено, что существенная взаимосвязь между размерными показателями заполнителя из термически модифицированной древесины и процессом его водопоглощения (интенсивностью сорбции и конечной степенью увлажнения) отсутствует.

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования технологических параметров подготовки сырья и получения изделий из термодревбетона методом полусухого вибропрессования.

В дальнейшем планируется выполнить исследования во временном диапазоне вымачивания заполнителя из термически модифицированной древесины 0–30 мин, а также изучить влияние начальной влажности такой древесины на последующую сорбцию воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Горностаева Е.Ю., Ласман И.А., Федоренко Е.А., Камоза Е.В. Древесно-цементные композиции с модифицированной структурой на макро-, микро- и наноуровнях // *Строит. материалы*. 2015. № 11. С. 13–16.

Gornostaeva E.Yu., Lasman I.A., Fedorenko E.A., Kamoza E.V. Wood-Cement Compositions with Structures Modified at Macro-, Micro-, and Nano-Levels. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*, 2015, no. 11, pp. 13–16. (In Russ.).

2. Крутов П.И., Склизков Н.И., Наназашвили И.Х., Сироткина Р.Б. и др. Использование отходов древесины для получения эффективных строительных материалов: обзор. М.: ОНТИ ЦНИИЭПсельстроя, 1978. 24 с.

Krutov P.I., Sklizkov N.I., Nanazashvili I.Kh., Sirotkina R.B. et al. *The Use of Wood Waste to Produce Efficient Building Materials: Review*. Moscow, Scientific and Technical Information Division of the Central Research Institute for Experimental Design of Rural Construction, 1978. 24 p. (In Russ.).

3. Мальцева Е.М. Разработка нормативно-технической основ на инновационный древесно-цементный композитный материал и на изделия из него: магистер. дис. (27.04.01). Йошкар-Ола, 2023. 120 с.

Mal'tseva E.M. *Development of Regulatory and Technical Framework for Innovative Wood-Cement Composite Material and Products Made of it*: Master's Thesis (27.04.01). Yoshkar-Ola, 2023. 120 p. (In Russ.).

4. Наназашвили И.Х. Быстровозводимые малоэтажные монолитные дома из арболита. Ч.1 // Строит. материалы, оборудование, технологии XXI в. 2009. № 11. С. 14–15.

Nanazashvili I.Kh. The "Quick-to-Erect" Low-Rise Monolith Buildings from the Arbolite: Part 1. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* = Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI century, 2009, no. 11, pp. 14–15. (In Russ.).

5. Наназашвили И.Х., Марданов М.К. Производство арболита из древесных отходов: обзор. информ. / М-во пром. стр-ва СССР. М.: ЦБНТИ Минпромстроя СССР, 1974. 47 с.

Nanazashvili I.Kh., Mardanov M.K. *Production of Wood Concrete from Wood Waste: Overview*. Moscow, Ministry of Industrial Construction of the USSR, Central Office for Scientific and Technical Information, 1974. 47 p. (In Russ.).

6. Патент 2 790 390 С1 РФ, МПК С04В 18/26(2006.01), С04В 28/04(2006.01), С04В 40/00(2006.01), С04В 111/20(2006.01). Способ изготовления термодревбетона: № 2021139396: заявл. 27.12.2021: опубл. 17.02.2023 / В.Ю. Чернов, Ю.В. Чернов, А.С. Разинов, И.Г. Гайсин, Е.С. Шарапов, Е.М. Мальцева.

Chernov V.Yu., Chernov Yu.V., Razinov A.S., Gajsin I.G., Sharapov E.S., Mal'tseva E.M. *Method for Producing Thermo-Wood-Concrete*. Patent RF no. RU 2 790 390 C1, 2023. (In Russ.).

7. Патент 2804105 РФ, МПК В27Л 11/00(2006.01). Устройство для измельчения термически модифицированной древесины: № 2023116238: заявл. 21.06.2023: опубл. 26.09.2023 / В.Ю. Чернов, Ю.В. Чернов.

Chernov V.Yu., Chernov Yu.V. *Device for Grinding Thermally Modified Wood*. Patent RF no. RU (11) 2804105, 2023. (In Russ.).

8. Сафин Р.Г., Степанов В.В., Хайруллина Э.Р., Гайнуллина А.А., Степанова Т.О. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2014. № 20. С. 123–128.

Safin R.G., Stepanov V.V., Khairullina E.R., Gainullina A.A., Stepanova T.O. Modern Construction Composite Materials Based on Wood Waste. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2014, no. 20, pp. 123–128. (In Russ.).

9. Хайруллина Э.Р., Сафин Р.Г., Тунцев Д.В. Эффективность применения предварительной обработки древесного наполнителя в производстве древесно-цементной композиции // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 3(51). С. 85–91.

Khairullina E.R., Safin R.G., Tuntsev D.V. The Effectiveness of the Use of Wood Filler Pretreatment in the Production of Wood-Cement Composition. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2021, no. 3(51), pp. 85–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-3-85-91>

10. Хасаншин Р.Р. Термическое модифицирование древесного наполнителя в производстве композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2019. 424 с.
Khasanshin R.R. *Thermal Modification of Wood Filler in the Production of Composite Materials*: Doc. Tech. Sci. Dis. Kazan, 2019. 424 p. (In Russ.).
11. Чернов В.Ю., Гайсин И.Г., Палкин А.А., Мальцева Е.М. Бетон на основе наполнителя из ТМД: особенности материала и перспективы использования // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Кострома, 8–11 сент. 2021 г. Кострома: Костром. гос. ун-т, 2021. С. 103–106.
Chernov V.Yu., Gaisin I.G., Palkin A.A., Maltseva E.M. The Concrete Based on TMW Filler: Features of the Material and Prospects of Use. *Actual Problems and Prospects for the Development of the Timber Industry: Materials of the IV International Scientific-Practical Conference*. Kostroma, Kostroma State University, 2021, pp. 103–106. (In Russ.).
12. Чернов В.Ю., Шаранов Е.С., Мальцева Е.М., Пегушина Е.Н. Исследование влияния термической модификации древесины на адгезионные и прочностные свойства древесно-цементной композиции // Вестн. МГСУ. 2023. Т. 18, вып. 9. С. 1394–1407.
Chernov V.Yu., Sharapov E.S., Mal'tseva E.M., Pegushina E.N. Effect of Thermal Modification of Wood on Adhesion and Strength Properties of Wood-Cement Composition. *Vestnik MGSU*, 2023, vol. 18, iss. 9, pp. 1394–1407. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.9.1394-1407>
13. Чижова М.А., Чижов А.П., Криворотова А.И. Технология композиционных материалов и изделий. Ч. 1. Технология композиционных материалов из древесных частиц и минеральных вяжущих. Красноярск: СибГТУ, 2012. 59 с.
Chizhova M.A., Chizhov A.P., Krivorotova A.I. *Technology of Composite Materials and Products. Part 1: Technology of Composite Materials from Wood Particles and Mineral Binders*. Krasnoyarsk, SibSTU, 2012. 59 p. (In Russ.).
14. Чудинов Б.С. Вода в древесине. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 270 с.
Chudinov B.S. *Water in Wood*. Novosibirsk, Nauka Publ. Sib. Department, 1984. 270 p. (In Russ.).
15. Al-Akhras N., Abu-Alfoul B. Effect of Wheat Straw Ash on Mechanical Properties of Autoclaved Mortar. *Cement and Concrete Research*, 2002, vol. 32, iss. 6, pp. 859–863. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00716-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00716-0)
16. Badilla P., Letelier V., Aros P., Careau F. Analysis of the Mechanical and Thermal Behaviour of Mortars Manufactured with Combined Use of Different Waste Products. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 503, art. no. 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012017>
17. Cai Ch., Heräjärvi H., Naapala A. Effects of Environmental Conditions on Physical and Mechanical Properties of Thermally Modified Wood. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 49, no. 11, pp. 1434–1440. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0180>
18. Fu Q., Yan L., Thielker N.A., Kasal B. Effects of Concrete Type, Concrete Surface Conditions and Wood Species on Interfacial Properties of Adhesively-Bonded Timber – Concrete Composite Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2021, vol. 107, art. no. 102859. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102859>
19. Guo A., Bu A., Aamiri O.B., Satyavolu J., Sun Zh. Impact of Thermally Modified Wood on Mechanical Properties of Mortar. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 208, pp. 413–420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.016>
20. Hakkou M., Pétrissans M., Gérardin P., Zoulalian A. Investigations of the Reasons for Fungal Durability of Heat-Treated Beech Wood. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, vol. 91, iss. 2, pp. 393–397. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.04.042>

21. Hill C., Altgen M., Rautkariauri L. Thermal Modification of Wood – a Review: Chemical Changes and Hygroscopicity. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, pp. 6581–6614. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z>
22. Hill C.A.S. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. John Wiley & Sons, Ltd., 2006. 264 p.
23. Kostic S., Merk V., Berg J.K., Hass P., Burgert I., Cabane E. Timber-Mortar Composites: The Effect of Sol-Gel Surface Modification on the Wood-Adhesive Interface. *Composite Structures*, 2018, vol. 201, pp. 828–833. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.108>
24. Liu Z., Han Ch., Li Q., Li X., Zhou H., Song X., Zu F. Study on Wood Chips Modification and its Application in Wood-Cement Composites. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, vol. 17, art. no. e01350. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01350>
25. Liu Z., Han Ch., Li X., Zhou H., Song X., Zu F. Study on Wood Chips Modification and its Effect on the Mechanical Properties of Wood-Cement Composite Material. *SSRN*, 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4020085>
26. Ramdane R., Leila Kh., Abdelouahed A., Belachia M. Influence of Biomass Ash on the Performance and Durability of Mortar. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 2022, vol. 32, iss. 2, pp. 53–71. <https://doi.org/10.2478/ceer-2022-0019>
27. Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbacheva G., Oblivin A.N. Factors Affecting the Quality of Wood-Cement Composites. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 2016, vol. 9(58), no. 2, pp. 63–70.
28. Song X., Liu Z., Li X., Zhou H., Han Ch. Surface Modification of Wood and its Effect on the Interfacial Bonding Properties of Cement-Based Wood Composites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2023, vol. 81, pp. 897–909. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-01926-7>
29. Verma Sh., Singh A., Gupta R., Sundriyal S. The Effect of Wood Ash on the Workability, Water Absorption, Compressive Strength in Cement Mortar. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, 2023, vol. 9, iss. 4, pp. 368–373. <https://doi.org/10.46501/IJMTST0904054>

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