ISSN 0536-1036 DOI: 10.37482/0536-1036

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

Научный рецензируемый журнал

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

3/381

2021

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

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

ISSN 0536-1036 DOI: 10.37482/0536-1036

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

NORTHERN (ARCTIC) FEDERAL UNIVERSITY
NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV

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 6 times a year

3/381

2021

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

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

А.Б. Егоров, А.М. Постников, А.А. Бубнов, Л.Н. Павлюченкова, А.Н. Партолина. Выращивание культур ели с применением современных гербицидов, не требующее проведения агротехнических уходов..... 9

Г.Н. Гордеева. Успешность интродукции редких растений в дендрарии Хакасии... 24

L.P. Rybashlykova, V.V. Lepesko. Assessment of Natural and Forest Reclaimed Forage Lands in Semi-Desert Conditions in Southern Russia..... 37

В.А. Усольцев, А.А. Парамонов, С.В. Третьяков, С.В. Коптев, И.С. Цепордей. Модель объема ствола ивы: мета-анализ..... 49

И.Т. Кищенко, Е.С. Ольхина. Рост вегетативных органов *Picea abies* (L.) Karst. в антропогенной среде..... 59

Н.А. Бабич, Е.Б. Карбасникова, М.М. Андронова, О.С. Залывская, Ю.В. Александрова, Н.П. Гаевский. Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в северо-восточную часть Русской равнины (обзор)..... 73

Л.В. Зарубина, Р.С. Хамитов. Сезонный рост сосны обыкновенной на заболоченных почвах Севера..... 86

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

О.Н. Бурмистрова, А.А. Просужих, Е.Г. Хитров, О.А. Куницкая, Е.Н. Лунева. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты..... 101

К.П. Рукомойников, В.О. Купцова. Модернизация конструкции механизма для очистки деревьев от сучьев многооперационными лесными машинами..... 117

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

М.А. Зырянов, С.О. Медведев, А.П. Мохирев. Влияние добавки измельченной хвои на качественные показатели древесноволокнистой плиты..... 125

Е.Г. Соколова, Д.С. Русаков, Г.С. Варанкина, А.Н. Чубинский. Влияние аэросила технического на свойства клеевых композиций..... 133

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

A.V. Pranovich, O.I. Antonov, A.A. Dobrovolsky. Pruning Influence on Chemical Composition of Spruce Wood (*Picea abies* (L.) Karst.)..... 145

Т.А. Королева, Л.А. Миловидова, А.А. Дряхлицын. Получение лиственной целлюлозы высокого выхода бисульфитным способом..... 161

Д.С. Миксон, В.И. Рощин. Углеводороды и сложные эфиры экстрактивных веществ хвои лиственницы сибирской..... 170

Е.Д. Софронова, В.А. Липин, В.К. Дубовый, Т.А. Суставова. Минимизация содержания хлора в беленой сульфатной целлюлозе для санитарно-гигиенических изделий и упаковки пищевых продуктов..... 186

CONTENTS

FORESTRY

A.B. Egorov, A.M. Postnikov, A.A. Bubnov, L.N. Pavluchenkova, A.N. Partolina. Cultivation of Spruce Plantations Using Modern Herbicides without Agrotechnical Weeding..... 9

G.N. Gordeeva. Effectiveness of Introduction of Rare Plants in the Arboretum of Khakassia..... 24

L.P. Rybashlykova, V.V. Lepesko. Assessment of Natural and Forest Reclaimed Forage Lands in Semi-Desert Conditions in Southern Russia..... 37

*V.A. Usoltsev, A.A. Paramonov, S.V. Tretyakov, S.V. Koptev, I.S. Tseporde*y. Generic Model of Willow Stem Volume: A Meta-Analysis..... 49

I.T. Kishchenko, E.S. Olkhina. Growth of Vegetative Organs of *Picea abies* (L.) Karst. in Anthropogenic Environment..... 59

N.A. Babich, E.B. Karbasnikova, M.M. Andronova, O.S. Zalyvskaya, Yu.V. Aleksandrova, N.P. Gayevskiy. Stepwise Introduction of Dendroflora Species to the Northeastern Part of the Russian Plain (Review)..... 73

L.V. Zarubina, R.S. Khamitov. Seasonal Growth of Scots Pine under the Conditions of Water-Logged Soils of the North..... 86

LOGGING TECHNOLOGIES

O.N. Burmistrova, A.A. Prosuzhih, E.G. Khitrov, O.A. Kunitskaya, E.N. Luneva. Theoretical Studies of Forwarder Productivity with Limited Impact on Soils..... 101

K.P. Rukomojnikov, V.O. Kuptcova. Design Improvement of the Mechanism of Delimbing by Multi-Operational Forest Machines..... 117

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

M.A. Zyryanov, S.O. Medvedev, A.P. Mokhirev. Effect of Addition of Chopped Needles on the Fiberboard Quality Indicators..... 125

E.G. Sokolova, D.S. Rusakov, G.S. Varankina, A.N. Chubinsky. Effect of Technical Aerosil on the Properties of Adhesive Compositions..... 133

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

A.V. Pranovich, O.I. Antonov, A.A. Dobrovolsky. Pruning Influence on Chemical Composition of Spruce Wood (*Picea abies* (L.) Karst.)..... 145

T.A. Koroleva, L.A. Milovidova, A.A. Dryakhlitsyn. Production of High-Yield Hardwood Pulp by Bisulfite Minimizing the Chlorine Content Cooking..... 161

D.S. Mikson, V.I. Roshchin. Hydrocarbons and Ethers of Extractive Substances of Siberian Larch Needles..... 170

E.D. Sofronova, V.A. Lipin, V.K. Dubovy, T.A. Sustavova. Minimizing the Chlorine Content in Bleached Sulfate Pulp for Sanitary Tissue Products and Food Packaging... 186

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 632*954:630*232
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-9-23

ВЫРАЩИВАНИЕ КУЛЬТУР ЕЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ГЕРБИЦИДОВ, НЕ ТРЕБУЮЩЕЕ ПРОВЕДЕНИЯ АГРОТЕХНИЧЕСКИХ УХОДОВ

А.Б. Егоров, д-р с.-х. наук; *ResearcherID: G-4300-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2624-214X*
А.М. Постников, канд. с.-х. наук; *ResearcherID: G-4313-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8942-8155*
А.А. Бубнов, канд. с.-х. наук; *ResearcherID: E-1666-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5716-3503*
Л.Н. Павлюченкова, канд. с.-х. наук; *ResearcherID: G-4285-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8884-2496*
А.Н. Партолина, канд. с.-х. наук; *ResearcherID: C-9983-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2594-5003*
Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Институтский просп., д. 21, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: herb.egorov@yandex.ru, cucule88@gmail.com, a.bubnov@list.ru, partolina.anna.spb@gmail.com

Аннотация. Неконтролируемое развитие нежелательной растительности при искусственном лесовосстановлении снижает приживаемость и темпы роста культур, а в некоторых случаях становится причиной их гибели. Применение лесовосстановительной техники часто крайне затруднено, поэтому самым перспективным вариантом решения данной проблемы является создание культур ели сеянцами с закрытой корневой системой с применением ручных посадочных орудий без предварительной механической обработки почвы. Длительная защита культур от нежелательной растительности обеспечивается использованием современных гербицидов, зарегистрированных для применения в лесном хозяйстве Российской Федерации. Приводятся результаты осуществлявшихся в Ленинградской области 3-летних полевых экспериментов по применению гербицидов и их смесей для ограничения конкуренции со стороны нежелательной растительности в первые годы после посадки культур ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.). Установлена высокая эффективность применения гербицидов для долговременного подавления травянистой и древесно-кустарниковой растительности. Смеси гербицидов раундап, ВР (360 г/л глифосата кислоты), анкор-85, ВДГ (750 г/кг калиевой соли сульфометурон-метила) и арсенал новый, ВК (250 г/л имазапира) сдерживали развитие травянистых сорняков в течение минимум 2 вегетационных сезонов. Также изучены процессы зарастания культур ели нежелательной растительностью после опрыскивания гербицидами, реакция саженцев на применение химических препаратов, показатели состояния и роста хвойных. Анализ полученных данных доказал возможность объединения предварительной защитной химической обработки гербицидами и посадки сеянцев за 1 технологический прием или проведение посадки сеянцев в течение нескольких месяцев после химической обработки, что существенно снижает риск повреждения саженцев гербицидами. Приживаемость культур, созданных посадкой 1-2-летними сеянцами с закрытой корневой системой, составляла 93–98 % при биометрических показателях, позволяющих ели

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

успешно конкурировать с нежелательной растительностью. Разработанный метод обеспечивает резкое снижение трудовых и денежных затрат на лесовосстановление по сравнению с традиционными технологиями, предусматривающими предварительную механическую обработку почвы и последующие агротехнические уходы за культурами.

Для цитирования: Егоров А.Б., Постников А.М., Бубнов А.А., Павлюченкова Л.Н., Партолина А.Н. Выращивание культур ели с применением современных гербицидов, не требующее проведения агротехнических уходов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-9-23

Финансирование: Финансирование исследования осуществлялось Федеральным агентством лесного хозяйства по государственному заданию ФБУ «СПбНИИЛХ» № 053-00003-17 ПР, утвержденному приказом от 26.12.2016 № 552.

Ключевые слова: лесные культуры, посадка, ель, сеянцы, гербициды, смеси гербицидов, химическая обработка.

Введение

В таежной зоне и зоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России в производительных лесорастительных условиях основным лимитирующим фактором роста и развития хвойных пород, в том числе ели европейской, в первые годы после посадки является мощная нежелательная травянистая растительность и вегетативное возобновление лиственных пород [1, 5, 8, 11, 14]. Одной из основных причин низкого качества или гибели культур становится недостаточное количество и несвоевременное проведение уходов. Поэтому требуется наибольшее их число и интенсивность [4, 7, 9, 10]. К моменту посадки сеянцев сплошные вырубки и другие лесокультурные площади часто оказываются уже покрытыми нежелательной растительностью. При этом удовлетворительного восстановления хвойных пород без проведения мер по устранению или ограничению сорной растительности не происходит. В ряде случаев, в том числе после ветровалов, применение лесовосстановительной техники, в частности тракторов с плугами и фрезами для механической обработки почвы под посадку культур или для содействия естественному возобновлению хвойных пород, крайне затруднено или невозможно. Наиболее перспективный вариант решения проблемы – создание культур ели европейской сеянцами с закрытой корневой системой (ЗКС) при помощи ручных посадочных орудий без предварительной механической обработки почвы и с одновременным длительным обеспечением их защиты от широкого спектра нежелательной растительности путем применения современных экологически безопасных гербицидов, зарегистрированных для производственного использования в лесном хозяйстве Российской Федерации. Сегодня и в обозримом будущем химический метод является наиболее производительным и эффективным [2, 3]. Об этом свидетельствует и опыт ведения лесного хозяйства в развитых зарубежных странах – Канаде, США, Австралии и др. [20].

В ближайшие 5–10 лет в европейской части Российской Федерации планируется резкое увеличение площадей лесных культур, создаваемых посадочным материалом с ЗКС. Его высокая стоимость, а также относительно небольшие размеры (высота, диаметр у шейки корня, объем корнезакрывающего кома) обусловливают необходимость эффективной защиты создаваемых культур от негативного влияния нежелательной растительности, что особенно актуально в производительных лесорастительных условиях.

В настоящее время в России разрешены для применения в лесном хозяйстве гербициды на основе пяти действующих веществ: глифосата, имазапира, сульфометурон-метила, трибенурон-метила и галоксифоп-Р-метила, а при химической обработке площадей под посадку культур – только трех из них (глифосата, имазапира и сульфометурон-метила) [12]. Известно, что в создании высокопродуктивных лесных насаждений важную роль играет регулирование живого напочвенного покрова, в том числе при помощи гербицидов, альтернативы которым в ближайшем будущем нет [13, 19]. При сравнении различных методов подготовки площадей под посадку древесных пород в США было установлено, что химический метод обеспечивает наиболее высокую приживаемость растений в течение первых пяти лет после посадки [15–18]. Также на основании многолетних исследований отмечается существенное увеличение продуктивности плантаций различных древесных пород в странах, где при уходе за лесом широко применяются химические методы – в Северной Америке (США и Канаде), Южной Америке и Южной Африке, Австралии и Новой Зеландии [20].

Для химической обработки площадей под лесные культуры в разных странах в основном используются общеистребительные гербициды, такие как глифосат (раундап), имазапир (арсенал, чоппер), сульфометурон-метил (оуст, анкор-85), метсульфурон-метил (эллай), гексазинон (велпар), а также различные смеси на их основе [16, 18].

Цель исследования – разработка малозатратного и эффективного метода выращивания культур ели без проведения агротехнических уходов с применением современных гербицидов на землях лесного фонда в производительных лесорастительных условиях.

Объекты и методы исследования

Полевые эксперименты проводились в 2017–2019 гг. в Гатчинском районе Ленинградской области, в Балтийско-Белозерском таежном районе таежной зоны. Было выполнено 4 опыта. Применялись гербициды, зарегистрированные в РФ для ведения лесного хозяйства. Варианты их использования и даты обработок даны ниже. Предварительной подготовки почвы не проводилось. Повторность опытов 3-кратная.

При закладке опытов руководствовались «Методическими указаниями по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве» [6]. Биологическая эффективность действия гербицидов на травянистую растительность определялась проективно-количественным методом по снижению, в %, проективного покрытия почвы травянистыми видами по отношению к контролю (без обработки), для чего закладывались временные учетные площади. Эффективность действия химических препаратов на нежелательные лиственные древесные породы в первый год после обработки оценивалась по отмиранию листьев, на второй год – по отмиранию стволов, в % от их общего количества.

Посадка осуществлялась под меч Колесова 1-2-летним посадочным материалом ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) с ЗКС. Сеянцы выращивались в кассетах Plantek-81 с торфяным субстратом объемом корнезакрывающего кома 85 см^3. При учетах определялась приживаемость саженцев, отмечалось наличие внешних признаков повреждений гербицидами. Биометрические показатели саженцев ели фиксировались в 2019 г. Статистическая обработка полученных

данных проводилась по стандартной методике с определением средних значений и доверительных интервалов при уровне значимости 0,05 ($X \pm tS_x$).

Опыт 1 был заложен 15 июня 2017 г. на участке площадью 1800 м^2, заросшем травянистой и древесно-кустарниковой растительностью. Средняя высота травянистых растений составляла 20…30 см, фазы развития – кущение, розетка. Химическая обработка была проведена полосами шириной 1,5 м с расстоянием между их осями 3 м. В течение 3 часов после обработки высажены культуры стандартными 1-летними сеянцами (первая ротация). На контрольной площади посадку не проводили.

Опыт 2 был заложен 23 июля 2017 г. на участке площадью 2400 м^2, заросшем нежелательной травянистой и древесно-кустарниковой растительностью. Ее средняя высота – 80…110 см, фазы развития – цветение, плодоношение. Химическая обработка проводилась полосами шириной 1,5 м. Через 36 дней после химической обработки (28 августа 2017 г.) высажены сеянцы ели разного возраста (посев 2016 и 2017 гг., первая ротация). Шаг посадки – 60 см. Через 10 мес. после применения гербицидов (10 мая 2018 г.) дополнительно были высажены 2-летние сеянцы ели (посев 2017 г., первая ротация). Шаг посадки – 60 см. В контрольном варианте посадку не проводили.

Опыт 3 был заложен 22 мая 2018 г. на участке 420 м^2, заросшем травянистыми растениями. Их средняя высота составляла 20…30 см, фазы развития – кущение, розетка. В течение 2 ч после опрыскивания высажены стандартные сеянцы ели (посев 2017 г., первая ротация). Шаг посадки – 30 см. На контрольной площади также была проведена посадка материала.

Опыт 4 был заложен 17 июля 2018 г. на участке площадью 300 м^2, заросшем травянистой растительностью средней высотой 80…110 см, фазы развития – цветение, плодоношение. Через 44 дня после применения гербицидов (29 августа) были высажены 2-летние сеянцы ели (посев 2017 г., первая ротация). Шаг посадки – 30 см. В контрольном варианте посадку не проводили.

Почва на всех участках была дренированная дерново-подзолистая легкосуглинистая, содержание гумуса – 2,8; 4,4; 2,8; 4,4 % в опытах 1–4 соответственно. Тип условий произрастания для случаев 1 и 3 – черничный, 2 и 4 – кисличный.

В опытах 1, 2 и 4 к моменту химической обработки преобладали однодольные растения, в опыте 3 – двудольные. Двудольные растения были представлены в основном вероникой лекарственной (*Veronica officinalis* L.), борщевиком сибирским (*Heracleum sibiricum* L.), иван-чаем узколистным (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.), бодяком разнолистным (*Cirsium heterophyllum* (L.) Hill), снытью обыкновенной (*Aegopodium podagraria* L.), купырем лесным (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.), дудником лесным (*Angelica sylvestris* L.), вербейником обыкновенным (*Lysimachia vulgaris* L.), медуницей лекарственной (*Pulmonaria officinalis* L.), земляникой обыкновенной (*Fragaria vesca* L.), зверобоем продырявленным (*Hypericum perforatum* L.), ландышем майским (*Convallaria majalis* L.), видами грушанки (*Pyrola* spp. L.), лапчаткой прямостоячей (калган) (*Potentilla erecta* L.), клевером луговым (*Trifolium pratense* L.), манжеткой обыкновенной (*Alchemilla vulgaris* L.), горошком мышиным (*Vicia cracca* L.), видами ястребинки (*Hieracium* spp.). Однодольные виды были представлены преимущественно видами вейника (*Calamagrostis* spp.), овсиком извилистым (*Avenella flexuosa* (L.) Drejer), щучкой дернистой (*Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv.), полевицей тонкой

(*Agrostis capillaries* L.), бором развесистым (*Milium effusum* L.), лисохвостом луговым (*Alopecurus pratensis* L.), ежой сборной (*Dactylis glomerata* L.). Из древесных растений в опытах 1 и 2 присутствовали виды ивы (*Salix* spp.), осина (*Populus tremula* L.), виды березы (*Betula* spp.) и ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moeuch.).

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные в ходе опыта 1 учеты показали, что в течение первого и второго вегетационных сезонов эффективность подавления нежелательной травянистой растительности очень высока и достигала в некоторых вариантах 100 % (табл. 1, рис. 1). Наибольшую действенность продемонстрировали смеси гербицидов вариантов 1–3; более низкую – варианта 4, особенно на второй год после обработки. В течение третьего вегетационного сезона во всех вариантах происходило резкое увеличение проективного покрытия почвы травянистыми растениями, в результате чего этот показатель практически сравнялся с показателем в контроле.

Таблица 1

Эффективность действия гербицидов на нежелательную травянистую растительность (опыт 1, обработка 15.06.2017)

Вариант опыта	Дата учета	Проективное покрытие почвы травянистыми растениями, %/его снижение, % к контролю		
		общее	однодольные	двудольные
1. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 50 г/га	15.09.2017	1/99	0/100	1/98
	27.08.2018	24/71	6/82	18/63
	21.08.2019	87/–2	22/45	65/–44
2. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 100 г/га	15.09.2017	0/100	0/100	0/100
	27.08.2018	13/84	3/91	10/80
	21.08.2019	87/–2	20/50	67/–49
3. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 150 г/га	15.09.2017	0/100	0/100	0/100
	27.08.2018	11/87	2/94	9/82
	21.08.2019	90/–6	13/68	77/–71
4. Раундап, 6 л/га	15.09.2017	8/90	1/97	7/86
	27.08.2018	45/46	10/71	35/29
	21.08.2019	92/–8	40/0	52/–16
5. Контроль (без обработки)	15.09.2017	84/–	35/–	49/–
	27.08.2018	83/–	34/–	49/–
	21.08.2019	85/–	40/–	45/–

Учеты состояния саженцев ели показали, что они практически не повреждались гербицидами в большинстве вариантов опыта. Косметические повреждения, отмеченные в год обработки во всех вариантах, исчезали в течение второго сезона, к концу которого более 90 % молодых елей было отнесено к категории «здоровые» (рис. 2). Доля отмерших по разным причинам саженцев не превышала 5 %. Биометрические показатели, зафиксированные в конце третьего после химической обработки сезона, свидетельствовали, что во всех вариантах опыта саженцы достигали необходимых для успешной конкуренции с нежелательной растительностью параметров без проведения агротехнических уходов.

Рис. 1. Эффективность действия смеси гербицидов раундап, 4 л/га + анкор-85, 100 г/га (опыт 1, обработка и посадка культур 15.06.2017, фото 19.07.2017)

Fig. 1. The effectiveness of the herbicide mixture Roundup, 4 L/ha + Anchor-85, 100 g/ha (experiment 1, the chemical treatment spruce planting carried out on 15.06.17, the photograph taken on 15.06.17, photo 19.07.17)

Рис. 2. Культуры ели в опыте 1 на следующий год после обработки смесью раундап, 4 л/га + анкор-85, 100 г/га (обработка и посадка культур 15.06.2017, фото 05.06.2018)

Fig. 2. The spruce plantation the year following the treatment with the mixture Roundup, 4 L/ha + Anchor-85, 100 g/ha (experiment 1, the chemical treatment and spruce planting carried out on 15.06.17, the photograph taken on 05.06.18)

Минимальные показатели прироста в высоту отмечены в варианте 3, что можно объяснить ингибирующим воздействием гербицида анкор-85 в максимальной норме применения (табл. 2).

Таблица 2

Влияние обработки гербицидами на рост саженцев ели (опыт 1, обработка 15.06.2017, учет 21.08.2019)

Вариант опыта	Диаметр саженца, мм	Высота саженца, см	Прирост в высоту, см	
			2018 г.	2019 г.
1. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 50 г/га	9,2 ± 0,42	44,1 ± 2,07	8,0 ± 0,76	19,5 ± 1,78
2. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 100 г/га	9,0 ± 0,38	46,4 ± 2,26	8,2 ± 0,71	21,3 ± 1,92
3. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 150 г/га	8,3 ± 0,38	43,1 ± 2,10	7,6 ± 0,74	18,0 ± 1,70
4. Раундап, 6 л/га	7,8 ± 0,40	45,2 ± 2,18	8,6 ± 0,77	19,1 ± 1,82

Эффективность подавления лиственных древесных пород уже через месяц после химической обработки была очень высокой во всех вариантах опыта: в наибольшей степени повреждалась береза (83…90 %), в меньшей – осина и виды ивы (65…79 %). К концу первого вегетационного сезона арборицидное действие препаратов значительно усилилось – во всех вариантах опыта эффективность подавления лиственных пород составляла 85…100 %. В течение следующих двух вегетационных сезонов она еще более возрастала и достигала для березы и осины 100 %, для ивы – 95…100 %. Восстановления лиственных пород от корневых систем не наблюдалось (табл. 3).

Таблица 3

Эффективность действия гербицидов на нежелательную древесную растительность (опыт 1, обработка 15.06.2017)

Вариант опыта	Дата учета	Отмирание листьев (деревьев), % от общего количества		
		ива (виды)	осина	береза
1. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 50 г/га	19.07.2017	65	70	86
	15.09.2017	88	90	100
	26.06.2018	97	100	100
	21.08.2019	100	100	100
2. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 100 г/га	19.07.2017	69	69	90
	15.09.2017	91	93	100
	26.06.2018	100	100	100
	21.08.2019	100	100	100
3. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 150 г/га	19.07.2017	68	65	83
	15.09.2017	85	88	100
	26.06.2018	99	100	100
	21.08.2019	100	100	100
4. Раундап, 6 л/га	19.07.2017	72	79	94
	15.09.2017	93	96	100
	26.06.2018	95	100	100
	21.08.2019	95	100	100

В опыте 2 снижение засоренности делянок в его вариантах 1 и 2, где применялись смеси гербицидов, составляло к концу первого вегетационного сезона 92…94 %, второго вегетационного сезона – 77…80 %, в то время как в варианте 3, где использовался только раундап, эти показатели были соответственно 90 и 31 % (табл. 4). К концу третьего вегетационного сезона проективное покрытие почвы травянистыми растениями существенно возросло во всех вариантах опыта, в основном за счет интенсивного разрастания двудольных видов растений, и лишь незначительно уступало этому показателю в контроле.

Таблица 4

Эффективность действия гербицидов на нежелательную травянистую растительность (опыт 2, обработка 23.07.2017)

Вариант опыта	Дата учета	Проективное покрытие почвы травянистыми растениями, %			Снижение проективного покрытия, % к контролю		
		общее	одно-дольными	дву-дольными	общего	одно-дольными	дву-дольными
1. Раундап, 6 л/га + + анкор-85, 150 г/га	28.08.2017	8	1	7	92	98	87
	27.08.2018	20	2	18	77	95	64
	26.08.2019	81	12	69	15	72	-33
2. Раундап, 6 л/га + + анкор-85, 150 г/га + + арсенал, 0,5 л/га	28.08.2017	6	0	6	94	100	89
	27.08.2018	18	1	17	80	97	66
	26.08.2019	79	9	70	17	79	–35
3. Раундап, 6 л/га	28.08.2017	10	2	8	90	95	85
	27.08.2018	61	30	31	31	21	38
	26.08.2019	93	41	52	2	5	0
4. Контроль (без обработки)	28.08.2017	98	43	55	–	–	–
	27.08.2018	88	38	50	–	–	–
	26.08.2019	95	43	52	–	–	–

В этом опыте гербициды также эффективно подействовали на нежелательные лиственные древесные породы (табл. 5). Уже в конце первого вегетационного сезона было отмечено отмирание листьев у осины и ольхи на 88…98 %, у видов ивы – на 85…88 %, у березы – на 100 %.

Таблица 5

Эффективность действия гербицидов на нежелательную древесную растительность (опыт 2, обработка 23.07.2017)

Вариант опыта	Дата учета	Отмирание листьев (деревьев), % от общего количества			
		ива (виды)	осина	береза	ольха серая
1. Раундап, 6 л/га + + анкор-85, 150 г/га	15.09.2017	85	96	100	88
	26.06.2018	97	100	100	100
	26.08.2019	100	100	100	100
2. Раундап, 6 л/га + + анкор-85, 150 г/га + + арсенал, 0,5 л/га	15.09.2017	100	100	100	100
	26.06.2018	100	100	100	100
	26.08.2019	100	100	100	100
3. Раундап, 6 л/га	15.09.2017	88	98	100	92
	26.06.2018	98	100	100	100
	26.08.2019	99	100	100	100

В течение двух следующих вегетационных сезонов происходило дальнейшее усиление действия гербицидов во всех вариантах опыта и к концу сезона 2019 г. произошло полное отмирание всех лиственных пород. Только в варианте 3 сохранились единичные экземпляры ивы с сильными повреждениями. Восстановления лиственных пород от корневых систем не наблюдалось.

На протяжении двух вегетационных сезонов не имели повреждений во всех вариантах опыта 90…98 % 2-летних саженцев ели. 1-летние нестандартные сеянцы, высаженные на части опытных делянок 28 августа 2017 г., характеризовались плохой приживаемостью во всех вариантах, причем доля отмерших саженцев возрастала в течение всего периода наблюдений и составляла к концу второго вегетационного сезона 22…46 % в зависимости от варианта.

Однолетние стандартные сеянцы, высаженные 10 мая 2018 г., показали высокую приживаемость к концу второго вегетационного сезона в вариантах 1 и 2 (96…98 %), а в варианте 3 – только 87 %, что объясняется отрицательным воздействием травянистой растительности, начавшей интенсивное восстановление после обработки раундапом (табл. 6).

Таблица 6

Влияние обработки гербицидами на рост саженцев ели (опыт 2, обработка 23.07.2017)

Вариант опыта	Возраст посадочного материала, дата посадки	Диаметр саженца, мм	Высота саженца, см	Прирост в высоту, см	
				2018 г.	2019 г.
1. Раундап, 6 л/га + + анкор-85, 150 г/га	Однолетний, 28.08.2017	4,8 ± 0,32	20,5 ± 1,52	4,4 ± 0,40	7,6 ± 0,72
	Двухлетний, 28.08.2017	7,8 ± 0,47	39,0 ± 2,91	8,6 ± 0,75	16,4 ± 1,41
	Однолетний, 10.05.2018	8,4 ± 0,47	40,8 ± 3,02	9,2 ± 0,80	17,4 ± 1,61
2. Раундап, 6 л/га + + анкор-85, 150 г/га + + арсенал, 0,5 л/га	Однолетний, 28.08.2017	5,2 ± 0,36	22,0 ± 1,61	4,6 ± 0,42	8,6 ± 0,86
	Двухлетний, 28.08.2017	8,4 ± 0,49	40,2 ± 2,92	9,5 ± 0,87	17,1 ± 1,54
	Однолетний, 10.05.2018	9,6 ± 0,49	47,9 ± 3,12	10,4 ± 0,91	23,6 ± 1,86
3. Раундап, 6 л/га	Однолетний, 28.08.2017	4,9 ± 0,35	18,7 ± 1,50	3,2 ± 0,34	7,3 ± 0,82
	Двухлетний, 28.08.2017	7,4 ± 0,42	35,7 ± 2,52	8,3 ± 0,75	13,1 ± 1,21
	Однолетний, 10.05.2018	8,1 ± 0,47	39,4 ± 2,90	8,9 ± 0,74	15,7 ± 1,41

В опыте 2 однолетняя ель, высаженная 28 августа 2017 г., продемонстрировала низкие показатели роста. Это подтверждает бесперспективность создания лесных культур мелкими нестандартными саженцами даже при использовании химического метода подавления нежелательной растительности. При посадке

в тот же срок культуры, созданные стандартным 2-летним посадочным материалом, продемонстрировали высокие показатели роста во всех вариантах опыта. Даже 1-летние стандартные сеянцы, использованные на части опытных делянок 10 мая 2018 г., по показателям роста превосходили 2-летние сеянцы, высаженные 28 августа 2017 г. во всех вариантах опыта (табл. 6).

В опыте 3 в год обработки эффективность подавления травянистой растительности составляла 70…82 %, причем в наибольшей степени гербициды снижали засоренность однодольными растениями – до 100 % в вариантах опыта 1 и 2 (табл. 7). К началу второго вегетационного сезона в этих вариантах сохранялись высокие показатели эффективности, а к концу происходило постепенное снижение. В целом за счет сохранившихся двудольных видов в течение второго вегетационного сезона эффективность действия гербицидов в вариантах 1 и 2 не превышала 74 %.

Таблица 7

Эффективность действия гербицидов на нежелательную травянистую растительность (опыт 3, обработка 22.05.2018)

Вариант опыта	Дата учета	Проективное покрытие почвы травянистыми растениями, % / его снижение, % к контролю		
		общее	однодольными	двудольными
1. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 50 г/га	27.08.2018	17/82	0/100	17/55
	18.06.2019	50/47	0/100	50/17
	26.08.2019	86/13	6/84	80/–33
2. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 100 г/га	27.08.2018	10/89	0/100	10/74
	18.06.2019	25/74	0/100	25/58
	26.08.2019	65/33	4/89	61/–1
3. Раундап, 6 л/га	27.08.2018	28/70	4/93	24/37
	18.06.2019	70/21	5/86	65/–17
	26.08.2019	81/17	6/84	75/–25
4. Контроль (без обработки)	27.08.2018	94/–	56/–	38/–
	18.06.2019	95/–	35/–	60/–
	26.08.2019	97/–	37/–	60/–

Наиболее низкие показатели эффективности наблюдались в варианте 3, где применялся раундап в норме 6 л/га: даже в год обработки эффективность подавления травянистых растений составляла только 70 %, а в следующем вегетационном сезоне произошло существенное увеличение доли двудольных видов в составе травянистой растительности, превысившее аналогичные показатели в контроле. В этом опыте не отмечено существенных различий в росте деревьев ели в опытных вариантах (табл. 8). Вместе с тем полученные показатели роста являются довольно высокими для второго года после посадки культур, создаваемых относительно некрупными сеянцами. В контроле, где сеянцы были высажены без предварительной химической обработки, отмечены гораздо более низкие показатели роста деревьев ели. Так, например,

текущий прирост в высоту за последний год был меньше практически в 2 раза, а разница в средней высоте превышала 10 см. Очевидно, что посадка с предварительной химической обработкой дает значительное преимущество в условиях для роста и развития культур ели по сравнению с посадкой без обработки.

Таблица 8

Влияние обработки гербицидами на рост саженцев ели (опыт 3, обработка 22.05.2018, учет 26.08.2019)

Вариант опыта	Диаметр саженца, мм	Высота саженца, см	Прирост в высоту 2019 г., см
1. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 50 г/га	8,2 ± 0,38	38,3 ± 2,64	17,2 ± 1,64
2. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 100 г/га	8,0 ± 0,32	37,5 ± 2,52	16,4 ± 1,42
3. Раундап, 6 л/га	7,4 ± 0,32	38,3 ± 2,76	16,9 ± 1,58
4. Контроль (без обработки)	6,9 ± 0,34	27,5 ± 2,39	9,1 ± 1,54

В опыте 4 в конце первого вегетационного сезона эффективность подавления травянистой растительности составляла 98…100 %. На следующий после обработки год этот показатель постепенно снижался и к концу сезона был в вариантах опыта 1 и 2 соответственно 81 и 98 %, а в варианте 3 не превышал 26 %. Таким образом, обработка одним раундапом не обеспечивала долгосрочной защиты посадок от нежелательной травянистой растительности (табл. 9).

Таблица 9

Эффективность действия гербицидов на нежелательную травянистую растительность (опыт 4, обработка 17.07.2018)

Вариант опыта	Дата учета	Проективное покрытие почвы травянистыми растениями, % / его снижение, % к контролю		
		общее	однодольными	двудольными
1. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 150 г/га	19.09.2018	0/100	0/100	0/100
	18.06.2019	2/98	1/98	1/98
	21.08.2019	18/81	4/90	14/71
2. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 100 г/га + + арсенал, 0,5 л/га	19.09.2018	0/100	0/100	0/100
	18.06.2019	2/98	1/98	1/98
	21.08.2019	16/84	5/87	11/77
3. Раундап, 6 л/га	19.09.2018	2/98	1/98	1/98
	18.06.2019	70/26	42/–42	28/58
	21.08.2019	85/12	55/–41	30/38
4. Контроль (без обработки)	19.09.2018	96/–	40/–	56/–
	18.06.2019	95/–	34/–	61/–
	21.08.2019	97/–	39/–	58/–

Состояние культур ели на протяжении всего периода наблюдений было удовлетворительным и в конце второго вегетационного сезона приживаемость во всех вариантах опыта составляла 93…95 %. Параметры роста культур существенно не различались, однако были несколько ниже в варианте с применением одного раундапа (табл. 10).

Таблица 10

Влияние обработки гербицидами на рост саженцев ели (опыт 4, обработка 17.07.2018, учет 21.08.2019)

Вариант опыта	Диаметр саженца, мм	Высота саженца, см	Прирост в высоту 2019 г., см
1. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 50 г/га	5,4 ± 0,24	32,0 ± 2,01	10,3 ± 0,83
2. Раундап, 4 л/га + + анкор-85, 100 г/га + + арсенал, 0,5 л/га	5,6 ± 0,23	32,3 ± 1,96	10,9 ± 0,74
3. Раундап, 6 л/га	5,2 ± 0,25	31,4 ± 2,04	9,5 ± 0,69

Заключение

1. Анализ литературы и результаты проведенных исследований показали, что наиболее перспективным вариантом решения проблемы зарастания культур нежелательной растительностью является проведение предварительной химической обработки лесокультурной площади баковыми смесями гербицидов с длительным защитным эффектом и последующая посадка сеянцев без проведения дорогостоящей механической обработки почвы.

2. Установлено, что применение в первой половине вегетационного периода (май–июль) 2-компонентных (раундап, 4 л/га + анкор-85, 100 г/га) и 3-компонентных (раундап, 4 л/га + анкор-85, 100 г/га + арсенал, 0,5 л/га) смесей гербицидов обеспечивает в течение 1,5-2 вегетационных сезонов высокую эффективность подавления широкого спектра нежелательной травянистой растительности и лиственных древесных пород. Раундап (6 л/га) вызывал быстрое отмирание травянистой растительности, но уже в конце первого вегетационного сезона происходило ее частичное восстановление за счет двудольных видов трав, а во втором сезоне эффективность его резко снижалась.

3. Токсическое воздействие гербицидов на саженцы ели было отмечено только при введении в состав смеси персистентного гербицида анкор-85 в максимальной норме (150 г/га) и посадке сеянцев в день обработки. Во всех других вариантах опытов применение гербицидов не оказывало отрицательного влияния на рост саженцев. Приживаемость культур, созданных посадкой стандартными 1-2-летними сеянцами с закрытой корневой системой, составляла 93…98 %.

4. В результате предварительной химической обработки саженцы достигают таких биометрических показателей, при которых не понадобится проведение последующих агротехнических уходов для успешного роста культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Гаврилова О.И.* Лесовосстановление вырубок и продуктивность лесных культур хвойных пород Республики Карелия: дис. … д-ра с.-х. наук. Петрозаводск, 2012. 332 с.

Gavrilova O.I. *Reforestation of Clear Cuttings and Productivity of Coniferous Forest Plantations of the Republic of Karelia*: Dr. Agric. Sci. Diss. Petrozavodsk, 2012. 332 p.

2. *Егоров А.Б.* Воспроизводство хозяйственно-ценных лесов с применением химического метода: история, современное состояние и перспективы развития // Тр. СПбНИИЛХ. СПб., 2000. Вып. 2(3). С. 18–33.

Egorov A.B. Reproduction of Economically Valuable Forests Using the Chemical Method: History, Current Status and Development Prospects. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute], 2000, iss. 2(3), pp. 18–33.

3. *Егоров А.Б., Жигунов А.В.* Лесовосстановление с применением химического метода. СПб.: СПбГЛТА, 2009. 68 с.

Egorov A.B., Zhigunov A.V. *Reforestation Using the Chemical Method*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2009. 68 p.

4. *Малаховец П.М.* Лесные культуры. Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. 222 с.

Malakhovets P.M. *Forest Plantations*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2012. 222 p.

5. *Мерзленко М.Д., Бабич Н.А.* Теория и практика искусственного лесовосстановления. Архангельск: САФУ, 2011. 239 с.

Merzlenko M.D., Babich N.A. *Theory and Practice of Artificial Reforestation*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2011. 239 p.

6. Методические указания по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве / отв. ред. В.И. Долженко. Всерос. науч.-исслед. ин-т защиты растений РАСХН, 2013. 280 с.

Methodological Guidelines for Registration Tests of Herbicides in Agriculture. Ed. by Dolzhenko V.I. Saint Petersburg, RAAS Publ., 2013. 280 p.

7. *Писаренко А.И., Мерзленко М.Д.* Создание искусственных лесов. М.: Агропромиздат, 1990. 270 с.

Pisarenko A.I., Merzlenko M.D. *Creation of Artificial Forests*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990. 270 p.

8. *Писаренко А.И., Редько Г.И., Мерзленко М.Д.* Искусственные леса. Ч. I. М.: ВНИИЦлесресурс, 1992. 308 с.

Pisarenko A.I., Redko G.I., Merzlenko M.D. *Artificial Forests*. Part I. Moscow, VNIITslesresurs Publ., 1992. 308 p.

9. *Редько Г.И., Бабич Н.А.* Лесовосстановление на Европейском Севере России. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1994. 188 с.

Red'ko G.I., Babich N.A. *Reforestation in the European North of Russia*. Arkhangelsk, Severo-Zapadnoye knizhnoye izdatel'stvo, 1994. 188 p.

10. *Родин А.Р.* Лесные культуры. М.: МГУЛ, 2008. 318 с.

Rodin A.R. *Forest Plantations*. Moscow, MGUL Publ., 2008. 318 p.

11. *Соколов А.И.* Лесовосстановление на вырубках Северо-Запада России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 215 с.

Sokolov A.I. *Reforestation of Clear Cuttings of the North-West of Russia*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2006. 215 p.

12. Список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. 2019 год: справ. изд. М., 2019. 848 с.

List of Pesticides and Agrochemicals Permitted for Use in the Russian Federation. 2019: Reference Edition. Moscow, 2019. 848 p.

13. *Чижов Б.Е.* Регулирование травяного покрова при лесовосстановлении. М.: ВНИИЛМ, 2003. 174 с.

Chizhov B.E. *Regulation of Grass Cover during Reforestation*. Moscow, VNIILM Publ., 2003. 174 p.

14. *Шипицина О.В.* Лесоводственная и экономическая эффективность искусственного лесовосстановления: дис. ... канд. с.-х. наук. Екатеринбург, 2009. 124 с.

Shipitsina O.V. *Forestry and Economic Efficiency of Artificial Reforestation*: Cand. Agric. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2009. 124 p.

15. Ezell A.W., Langston V. Use of Milestone VM PLUS in Forestry Site Preparation Mixtures. *Proceedings of the 64th Annual Meeting of the Southern Weed Science Society*. Red Hook, NY, Curran Associates, Inc., 2011, vol. 64, p. 160.

16. Ezell A.W., Yeiser J.L., Self A.B. Mixtures of Glyphosate, Imazapyr and Aminopyralid for Site Preparation. *Proceedings of the the 68th Annual Meeting of the Southern Weed Science Society.* SWSS, 2015, vol. 68, p. 97.

17. Gardner A.P., Richardson R.J., Roten R.L., Hoyle S.T. Control of Selected Woody Plants with Aminopyralid and Aminopyralid Mixtures. *Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the Southern Weed Science Society.* SWSS, 2009, vol. 62, p. 426.

18. Hoepting M.K., Wagner R.G., McLaughlin J., Pitt D.G. Timing and Duration of Herbaceous Vegetation Control in Northern Conifer Plantations: 15-Years Tree Growth and Soil Nutrient Effects. *Forestry Chronicle*, 2011, vol. 87, iss. 3, pp. 398–413. DOI: https://doi.org/10.5558/tfc2011-030

19. McCarthy N., Bentsen N.C., Willoughby I., Balandier P. The State of Forest Vegetation Management in Europe in the 21st Century. *European Journal of Forest Research.* 2011, vol. 130, iss. 1, pp. 7–16. DOI: https://doi.org/10.1007/s10342-010-0429-5

20. Wagner R.G., Little K.M., Richardson B., Mcnabb K. The Role of Vegetation Management for Enchancing Productivity of the World's Forests. *Forestry*, 2006, vol. 79, iss. 1, pp. 57–79. DOI: https://doi.org/10.1093/forestry/cpi057

CULTIVATION OF SPRUCE PLANTATIONS USING MODERN HERBICIDES WITHOUT AGROTECHNICAL WEEDING

Alexandr B. Egorov, *Doctor of Agriculture; ResearcherID: G-4300-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2624-214X*
Anton M. Postnikov, *Candidate of Agriculture; ResearcherID: G-4313-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8942-8155*
Alexander A. Bubnov, *Candidate of Agriculture; ResearcherID: E-1666-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5716-3503*
Lidiya N. Pavluchenkova, *Candidate of Agriculture; ResearcherID: G-4285-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8884-2496*
Anna N. Partolina, *Candidate of Agriculture; ResearcherID: C-9983-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2594-5003*
Saint Petersburg Forestry Research Institute, Institutskiy prosp., 21, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: herb.egorov@yandex.ru, cucule88@gmail.com, a.bubnov@list.ru, partolina.anna.spb@gmail.com

Abstract. Uncontrolled development of unfavorable vegetation during artificial reforestation reduces survival and growth rates of planted trees, and in some cases causes their death. The use of reforestation equipment is often extremely difficult, therefore the most promising solutions are those involving creation of spruce plantations using seedlings with closed roots and manual planting tools without preliminary mechanical tillage. Long-term protection of plantations from undesirable vegetation is ensured by the use of modern herbicides registered for use in the forest sector in the Russian Federation. The article presents the results of 3-year field experiments on the use of herbicides and their mixtures to supress undesirable vegetation in the first years after planting European spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in the Leningrad region. High efficiency of herbicides for long-term suppression of shrubs, and herbaceous and woody plants was found. A mixture of herbicides Roundup, WS (360 g/L glyphosate acid),

Anchor-85, WDG (750 g/kg sulfometuron-methyl potassium salt) and Arsenal, WC (250 g/L imazapyr) inhibited the development of herbaceous weeds for at least two growing seasons. The processes of undesirable vegetation development after spraying plantations with herbicides, the reaction of seedlings to the use of chemicals, indicators of conditions and growth of conifers were also studied. Analysis of the obtained data proved the possibility of combining a protective chemical pretreatment with herbicides and planting seedlings in a single technological procedure or planting seedlings within a few months after chemical treatment, which significantly reduces the risk of damage to seedlings by herbicides. The survival rate of plantations created by planting one- or two-year-old seedlings with closed roots was 93–98 %; and the biometric indicators were such that spruce plants could successfully compete with undesirable vegetation. The application of the developed method ensures a substantial reduction in labor and other reforestation costs compared to traditional technologies involving preliminary mechanical tillage and subsequent agrotechnical weeding of plantations.
For citation: Egorov A.B., Postnikov A.M., Bubnov A.A., Pavluchenkova L.N., Partolina A.N. Cultivation of Spruce Plantations Using Modern Herbicides without Agrotechnical Weeding. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 9–23. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-9-23
Funding: The study was financially supported by the Federal Agency for Forestry within the state assignment of the Saint Petersbutg Forestry Research Institute No. 053-00003-17 ПР, approved by Order No. 552 of 26.12.16.

Keywords: forest plantations, planting, spruce, seedlings, herbicides, herbicide mixtures, chemical treatment.

Поступила 28.03.20 / Received on March 28, 2020

УДК 630*635.925(571.513)
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-24-36

УСПЕШНОСТЬ ИНТРОДУКЦИИ РЕДКИХ РАСТЕНИЙ В ДЕНДРАРИИ ХАКАСИИ

Г.Н. Гордеева, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.; *ResearcherID: AAH-2491-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9225-3659*
Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии, ул. Садовая, д. 5, с. Зеленое, Усть-Абаканский р-н, Республика Хакасия, Россия, 655132;
e-mail: gordeeva.gal2011@yandex.ru

Аннотация. Согласно Международной программе ботанических садов, в коллекции института сохраняется около 500 видов древесных растений – представителей 6 регионов Земли. Дендрарий расположен в сухостепной зоне республики. В нем произрастают 44 вида деревьев, кустарников и лиан разного статуса редкости. Многие из них являются красивоцветущими, поэтому могут использоваться для озеленения. Цель работы – подведение итогов интродукции редких и исчезающих растений для дальнейшего применения в благоустройстве селитебных территорий степной зоны Хакасии. Объекты исследования – 21 вид редких растений дендрария института. Определяли сроки наступления фенологических фаз, ритм роста и развития, зимостойкость видов, сроки и продолжительность цветения, способы размножения. Каждому растению присваивали интродукционный балл и рассчитывали перспективность. Средний возраст редких растений составил 40,7 лет. Все изучаемые образцы являются рано отрастающими (2–3-я декада апреля, 1-я декада мая). 72 % видов в новых условиях выращивания проходят полный жизненный цикл, 19 % – цветут, но не плодоносят, 9 % – не цветут. По срокам цветения 53 % редких кустарников являются раноцветущими (май). Наибольший период цветения выявлен у 19 % видов. Основные фенологические фазы проходят в стабильные сроки, невысокие значения квадратического отклонения это подтверждают. Для 28 % изучаемых видов характерен самосев. В условиях дендрария 42 % размножаются как семенами, так и вегетативно; 33 % – вегетативно и 23 % – семенами. Интродукционный балл показывает степень адаптации растения к новым условиям. По 10 видов имеют 5-й и 4-й баллы (95,2 %), *Menispermum dahuricum*, который каждый год обмерзает до уровня почвы, – 3-й балл. На основе анализа показателей жизнеспособности изучаемых растений устанавливали их перспективность. Неперспективными оказались 4 % видов, менее перспективными – 20 %. Многолетние исследования биологических особенностей редких древесных растений показали, что вполне перспективные (38 %) и перспективные (38 %) из них могут использоваться в благоустройстве селитебных территорий Хакасии. Проводится внедрение в производство новых видов: *Deutzia glabrata, Armeniaca mandshurica, Prinsepia sinensis, Spiraea trilobata, Rosa spinosissima* – для одиночных и групповых посадок.

Для цитирования: Гордеева Г.Н. Успешность интродукции редких растений в дендрарии Хакасии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 24–36. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-24-36

Ключевые слова: редкие и исчезающие растения, интродукция, дендрарий, степная зона, Хакасия, фенология, рост, зимостойкость, размножение.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares that there is no conflict of interest

Введение

Масштаб и интенсивность вмешательства человека в экосистемы приводят к существенной деградации и фрагментации природных местообитаний, что, наряду с глобальными изменениями климата, способствует резкой потере биологического разнообразия [2]. В настоящее время только 5 % видов сосудистых растений протестировано на полезность для людей [20], многие же виды, возможно, потенциально являющиеся пищевыми, лекарственными или техническими, могут быть потеряны до выявления их полезных свойств. Введение растений в культуру через коллекции ботанических садов не обозначает снижающуюся глобальную роль данных видов в обеспечении пищевой, экологической, медицинской и иной безопасности [13].

Существует мнение, что борьба за сохранение биоразнообразия может быть проиграна, так как факторы, приводящие к его деградации, более мощные, чем усилия, предпринимаемые для защиты природы [21]. Значительную роль в этом процессе играют изменяющиеся условия окружающей среды – изменение климата. Несмотря на неуверенные прогнозы о его влиянии на коллекции в текущем столетии, ботанические сады должны быть готовы к разным вариантам развития событий. В г. Дублине в июне 2010 г. принят новый вариант Международной программы ботанических садов по сохранению растений [18], который способствует выполнению Глобальной стратегии [19]. Если изменения климата действительно будут иметь место в ближайшие десятилетия, то неизбежным станет катастрофическое обеднение биоразнообразия [17].

По последним данным в ботанических садах содержится 1414 видов сибирской флоры из 115 семейств, что составляет почти 31 % всех растений Сибири. Среди этого количества 56 видов внесено в Красную книгу Российской Федерации и около 500 – в региональные Красные книги Сибири [3]. Является актуальным изучение состояния редких и исчезающих растений, находящихся в дендрариях и ботанических садах. Некоторые редкие виды имеют больший культурный ареал, чем природный [16]. Их применение в озеленении и благоустройстве позволяет разнообразить существующий ассортимент.

Цель исследования – подведение итогов успешности интродукции редких и исчезающих древесных растений, произрастающих в дендрарии, для дальнейшего использования в озеленении населенных пунктов степной зоны Хакасии.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются древесные растения разного статуса редкости, собранные в коллекции Научно-исследовательского института аграрных проблем Хакасии. Категории статуса редкости видов определяли по шкале, разработанной для Красной книги РФ [5]. Дендрарий площадью 1,1 га закладывали в 1975 г. Количество экземпляров каждого редкого вида от 4 (*Amygdalus pedunculata*, *Juniperus rigida, Betula raddeana*) до 15 и более.

На 2000 г. в коллекции древесных растений количество редких и исчезающих, занесенных в Красные книги СССР и РСФСР, было около 100 видов [9]. В настоящее время их насчитывается 44: 18 видов древесных и 5 редких травянистых пионов, входящих в Красную книгу Российской Федерации; 22 редких вида Сибири [12] и 4, входящих в Красную книгу Республики Хакасии [6].

Из 44 редких видов на маршруте наблюдений находится 21: 6 видов деревьев (28,6 %, *Armeniaca mandshurica* (Maxim.) Skvorts, *Betula maximowicziana* Reg., *Betula raddeana* Trautv., *Juniperus rigida* Sieb.et Zucc., *Tilia sibirica* L., *Tilia cordata* Mill.); 13 видов кустарников (61,9 %, *Amygdalus pedunculata* Pall, *Cotoneaster alaunicus* Golits., *Cotoneaster lucidus* Schlecht., *Deutzia glabrata* Kom., *Euonymus nana* Bieb., *Euonymus sacrosanct* Koidz., *Juniperus sargentii* (A.Henry) W.C.Chenget L.K. Fu, *Juniperus sabina* Sieb.et Zucc., *Myricaria bracteata* Royle, *Prinsepia sinensis* (Oliv.) Bean., *Rosa spinosissima* L., *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* Pojark., *Spiraea trilobata* L.); две лианы (9,5 %, *Aristolochia manshuriensis* Kom., *Menispermum dahuricum* L.).

Дендрарий расположен в степной части Республики Хакасия на второй надпойменной террасе р. Абакан, в 13 км от столицы – г. Абакана. Климат резко континентальный, с большим колебанием суточных температур, возвратными заморозками в весенний период, ранними осенними заморозками (до –5 ºС). Зимы морозные (средняя температура января –21 °С), глубина снежного покрова в дендрарии составляет 15–17 см, в отдельные годы – до 5 см, вследствие чего происходит сильное промерзание почвы (до 3 м). Среднегодовое количество осадков достигает 320 мм. Жаркие дни приходятся на июль (до +38 °С) при относительной влажности воздуха 5–7 %. Весна короткая, в мае дуют сильные ветра-суховеи – до 25–30 м/с. Осень длинная, теплая, часто сухая. Почвы темно-каштановые, карбонатные, с неблагоприятными для роста растений физико-химическими свойствами и щелочной реакцией почвенного раствора [4]. Орошение производится водопроводной водой.

За древесными растениями осуществлялись фенологические наблюдения [11] с интервалом в 3–4 дня по основным фазам развития: начало распускания вегетативных и генеративных почек; появление первого свободного листа; начало и конец цветения; окончание роста побегов; созревание семян; появление осенней окраски листьев; начало и конец листопада. На основе анализа показателей жизнеспособности древесных растений проводилась интегральная оценка их перспективности [10]. Шкала степени одревеснения побегов (1-летних) следующая: I – вызревает полностью на 100 % длины – 20 баллов; II – вызревает на 75 % – 15 баллов; III – вызревает на 50 % – 10 баллов; IV – не вызревает на 25 % – 5 баллов; V – не вызревает – 1 балл. Шкала оценки зимостойкости: I – растение не обмерзает – 25 баллов; II – обмерзает часть однолетнего побега – 15 баллов; III – однолетние побеги обмерзают целиком – 15 баллов; IV – обмерзают старые побеги – 10 баллов; V – обмерзает до уровня снега – 5 баллов; VI – растение обмерзает до корневой шейки – 3 балла; VII – растение вымерзает целиком – 1 балл. Оценка сохранения габитуса: I – сохраняется – 10 баллов; II – восстанавливается – 5 баллов; III – не восстанавливается – 1 балл. Побегообразовательная способность оценивается по 3-ступенчатой шкале: I – высокая – 5 баллов; II – средняя – 3 балла; III – низкая – 1 балл. Оценка прироста: ежегодный – 5 баллов; неежегодный – 2 балла. Генеративное развитие: I – плодоносит и дает всхожие семена – 25 баллов; II – плодоносит, но семена не вызревают – 20 баллов; III – цветет, но не плодоносит – 15 баллов; IV – не цветет – 1 балл. Возможные способы размножения: наличие самосева – 10 баллов; II – способом посева – 7 баллов; III – естественное вегетативное размножение – 5; IV – искусственно – 3 балла; IV – не размножается – 1 балл.

Статистическая обработка фенологических данных приведена за 10 летний период [1], дисперсионный анализ и вариационная статистика выполнены с применением пакета программ [14]. Латинские названия указаны в соответствии со сводкой Черепанова [15].

Результаты исследования и их обсуждение

Средний возраст редких растений дендрария достигает 40,7 лет, что свидетельствует об их высокой адаптивности в новых условиях произрастания. Большинство (72 %) проходит полный цикл развития и формирует семена разного качества. Исключением являются четыре вида (19 %): *Amygdalus pedunculata, Aristolochia manshuriensis, Juniperus rigida, Juniperus sargentii* – они цветут, но не дают семян. Два вида – *Juniperus sabina* и *Menispermum dahuricum* (9 %) – не цветут. У первого, произрастающего в горных районах Хакасии, это, возможно, обусловлено сухостью воздуха в весенний период и сильными ветрами, способствующими быстрому иссушению пыльцы. Второй в условиях дендрария не цветет: его сильно затеняют и лишают питания соседние разросшиеся деревья – в более открытых местах с лучшим орошением он достигает высоты до 2,5–3,0 м, активно разрастаясь корневыми отпрысками, цветет и плодоносит. Деревья в дендрарии обычно ниже, а кустарники выше и шире, чем в природных условиях (табл. 1).

Наличие самосева свидетельствует о полной адаптации вида в новых для него условиях произрастания. Если растение проходит полный цикл развития, у него формируются фертильная пыльца, полноценные семена, то, как правило, появляется самосев. Он наблюдается у 6 из рассматриваемых видов: *Armeniaca mandshurica, Cotoneaster lucidus, Deutzia glabrata, Prinsepia sinensis, Tilia sibirica, Tilia cordata.* У первых двух самосев был непосредственно под материнским растением или недалеко от него. У третьего, в связи с затенением и большой конкуренцией за воду, в дендрарии это явление редко. Однако при перенесении в более благоприятные условия на следующий год после созревания и осыпания семян вокруг кустов появляется массовый самосев, который благополучно перезимовывает. На второй год молодые растения представляют собой разветвленные кустики с 3–4 побегами до 20–25 см высотой. Они быстро растут.

В условиях дендрария 38 % видов размножаются как семенами, так и вегетативно; 38 % – вегетативно и 24 % – семенами.

В экологическом отношении к ксерофитам и мезофитам отнесено по 5 видов (24 %), к гигрофитам – 4 %. Остальные виды (48 %) являются переходными, что дает им возможность приспосабливаться к сложным климатическим условиям региона.

Основным лимитирующим фактором нормального роста и развития изучаемых растений является недостаточная зимостойкость. Рассматриваемые виды в природных условиях Хакасии имеют I и II баллы по этому критерию (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика редких растений дендрария института

Название растения	Статус редкости	Экологическая группа	Высота в дендрарии / высота в природе	Диаметр куста, м	Наличие самосева	Способ размножения	Интродукционный балл	Зимостойкость, балл
Amygdalus pedunculata	3*	К	3–3,5 / 2,0	3,0	–	В (ч)	4	II
Aristolochia manshuriensis	1*	Г	до 6,0 / –	–	–	В (ч)	4	II
Armeniaca mandshurica	3г*	Мк	8,0 / 13,0–15,0	5,0	+	С, В	5	I–II
Betula maximowicziana	1*	М	12,0 / 25,0–30,0	4,0	–	С	4	I
Betula raddeana	3б*	Мк	13,0 / 10,0	3,5	–	С	4	I
Cotoneaster alaunicus	3а*	К	1,6 / –	2,5	–	С, В (ч)	5	I
Cotoneaster lucidus	3а*	К	2,0 / 2,0–3,0	2,3	+	С, В (ч)	5	I
Deutzia glabrata	2а*	М	2,0 / 2,5–3,0	2,5–3,0	+	С, В (ч)	4	I–II
Euonymus nana	1*	Км	0,2–0,3 / 0,2–1,0	–	–	В (о)	4	I–II
Euonymus sacrosancta	2**	Мк	1,6 / до 2,0	2–2,5	–	С, В (ч)	5	I
Juniperus sabina	2***	К	0,8 / 1,0	3,0	–	В (ч)	4	I
Juniperus rigida	2*	Км	5,5–6,0 / 2,0–8,0	2,0	–	В (ч)	4	I
Juniperus sargentii	3г*	Км	2,0 / –	3,5	–	В (ч)	4	I
Menispermum dahuricum	2***	Мк	–	–	–	В (о)	5	VI
Myricaria bracteata	2***	Мг	1,5 / до 2,0	1,2	–	С, В (ч)	5	II
Prinsepia sinensis	2а*	М	2,0–2,4 / 1,5–2,5	2,5	+	С	5	I
Rosa spinosissima	2***	К	1,5–2,0 / 0,6–1,5	0,5	–	С, В (о)	5	I
Sorbocotoneaster pozdnjakovii	3а*, **	Мк	4,2–4,5 / 3,0	1,5–2,0	–	В (п)	4	I
Spiraea trilobata	2***	Кпт	до 1,0 / до 1,0	0,6	–	С, В (ч)	5	I
Tilia sibirica	2**	М	6,0 / 30,0	3,0–3,5	+	С	5	I
Tilia cordata	2**	М	5,0 / –	2,5–3,0	+	С	4	I

Примечание: Статус редкости: * – вид внесен в Красную книгу Российской Федерации; ** – растение входит в сводку «Редкие и исчезающие виды флоры Сибири»; *** – вид внесен в Красную книгу Республики Хакасия. Обозначения: М – мезофиты, К – ксерофиты, Г – гигрофиты, Мк – мезоксерофиты, Км – ксеромезофиты, Мг – мезогигрофиты, Кпт – ксеропетрофиты; С – семенной, В – вегетативный (ч – черенки, о – отпрыски, п – прививка).

I баллом характеризуются 66,6 % видов, они хорошо переносят низкие температуры. II балл присвоен 14,3 % видов, у них каждый год обмерзают концы побегов (*Amygdalus pedunculata, Aristolochia manshuriensis, Myricaria bracteata*). Переходные баллы (I – II) характерны также для 14,3 % видов, которые в отдельные зимы могут незначительно обмерзать и благополучно восстанавливаться (*Armeniaca mandshurica, Deutzia glabrata, Euonymus nana*). Побеги *Menispermum dahuricum* каждый год полностью обмерзают до корневой шейки, весной отрастают заново (VI балл).

Определение ритма развития имеет большое значение для характеристики степени зимостойкости интродуцированных растений. Установлено, что ранние начало и окончание вегетации являются надежными признаками относительно высокой зимостойкости древесных растений [7]. Все объекты исследования имеют ранние сроки отрастания – 2–3-я декады апреля, 1-я декада мая. Наибольшей вариабельностью отличается начало распускания вегетативных и генеративных почек, на которое сильное влияние оказывают абиотические факторы. У отдельных видов (*Euonymus nana*) высокая изменчивость отмечена в наступлении фазы окончания роста побегов (30,7 %), что связано с условиями вегетационного сезона. При наступлении периода дождей (август) происходит возобновление роста (табл. 2). Фазы начала и конца цветения являются важными для характеристики биологии вида, свидетельствуют об адаптивной реакции растения к новым условиям. В то же время онтогенетический аспект цветения особи обусловлен генетической программой вида и в малой степени зависит от условий года [8]. Это подтверждается низкими и средними значениями коэффициента вариации начала и конца цветения рассматриваемых растений.

В условиях степной зоны кустарники разделены по срокам цветения на две группы: цветение в 1–3-й декадах мая (54 % видов); цветение в 1–2-й декадах июня (46 %). *Amygdalus pedunculata, Euonymus sacrosancta, Juniperus rigida, Prinsepia sinensis, Sorbocotoneaster pozdnjakovii, Myricaria bracteata, Spiraea trilobata* сформировали 1-ю группу. 2-я объединила *Cotoneaster alaunicus, Cotoneaster lucidus, Deutzia glabrata, Euonymus nana, Juniperus sargentii, Rosa spinosissima.*

Наибольший период цветения установлен у *Rosa spinosissima*, *Aristolochia manshuriensis*, *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* и *Euonymus sacrosancta* (44±3, 20±3, 18±2 дней соответственно). *Aristolochia manshuriensis* и *Euonymus sacrosancta* зацветают примерно в одинаковые сроки (табл. 2). В этот период прохладно, почвенной влаги достаточно для прохождения данной фенофазы, но дуют сильные иссушающие ветра, что является отрицательным фактором для завязывания семян у *Aristolochia manshuriensis*. В условиях дендрария этот вид не плодоносит. У *Euonymus sacrosancta* семена завязываются ежегодно. У *Sorbocotoneaster pozdnjakovii* семена завязываются, но, в связи с гибридным происхождением, имеют крайне низкую всхожесть. Получен один сеянец из семян собственной репродукции, который на 7-м году зацвел и сформировал плоды.

Наименьший период цветения характерен для *Betula maximowicziana*, *Juniperus sargentii*, *Cotoneaster lucidus* и *Amygdalus pedunculata*. Последний зацветает в I декаде мая, покрываясь простыми нежно-розовыми цветками еще до полного распускания листьев. По интенсивности цветения он значительно уступает другим видам миндаля, но более засухоустойчив. Плодоношение слабое (3–5 плодов на куст), последние 5 лет плоды не завязывались, возможно, в связи с возрастом. *Betula maximowicziana* и *Betula raddeana* в условиях возможных возвратных заморозков и сильных иссушающих ветров в период цветения полноценных семян не завязывают, самосева в дендрарии нет.

Таблица 2

Рост и развитие редких растений в дендрарии института

Название растения	Фенологические фазы роста и развития, даты*										Период, дни		Атипичность
	Начало развития почек		Первый свободный лист	Окончание роста побегов	Цветение		Созревание семян	Появление осенней окраски	Листопад		вегетации	цветения	
	вегетативных	генеративных			начало	конец			начало	конец			
Amygdalus pedunculata	27,4±2* 10,9	22,4±4 21,2	10,5±1 5,4	4,8±3 4,1	10,5±2 10,4	19,5±3 9,2	18,8±4 7,2	18,8±4 7,2	15,9±5 6,2	6,1±1 1,5	162±5 8,1	10±4 2,2	0
Aristolochia manshuriensis	1,5±4 16,5	23,5±3 7,8	26,5±2 8,1	28,7±5 8,3	20,5±3 7,8	18,6±3 5,7	–	8,9±5 6,2	25,9±1 1,0	13,1±4 4,8	166±8 15,1	20±3 5,6	– 0,01
Armeniaca mandshurica	26,4±1 4,3	20,4±6 21,8	12,5±3 6,9	5,7±8 18,5	30,4±4 14,2	11,5±4 12,1	28,7±1 0,9	17,9±6 6,2	23,9±3 3,2	8,1±5 4,6	165±5 4,8	12±4 11,2	0
Betula maximowicziana	6,5±3 11,6	14,5±4 13,8	12,5±2 5,6	1,7±12 16,9	12,5±2 4,6	17,5±2 5,6	17,7±4 5,4	3,9±6 7,2	30,9±4 3,9	8,1±5 3,8	147±6 15,4	7±1 3,1	– 0,01
Betula raddeana	16,4±2 9,7	27,4±4 11,3	7,5±3 9,8	11,7±11 15,8	8,5±6 19,6	19,5±1 2,0	10,7±4 3,2	30,8±4 4,7	8,9±8 10,5	14,1±1 1,2	181±9 18,7	11±3 4,8	0
Cotoneaster alaunicus	16,4±2 10,5	10,5±4 14,1	3,5±3 12,0	20,6±5 11,8	5,6±2 4,8	17,6±2 6,1	10,9±6 6,2	20,8±1 2,3	24,9±2 2,4	3,1±5 3,8	171±6 15,8	13±2 11,3	– 0
Cotoneaster lucidus	24,4±6 11,9	6,5±7 21,8	2,5±4 17,0	13,6±5 5,1	10,6±2 6,3	17,6±2 6,0	1,9±2 2,0	25,8±3 4,1	19,9±3 4,0	8,1±4 2,9	167±5 15,4	10±2 19,3	– 0
Deutzia glabrata	17,4±5 23,9	2,5±3 11,2	2,5±3 11,8	19,6±4 13,1	7,6±2 5,3	20,6±3 6,1	9,9±2 1,8	7,9±6 8,9	26,9±2 1,6	7,1±2 2,4	173±5 13,9	14±4 16,3	0,01
Euonymus nana	3,5±2 6,4	–	10,5±1 5,2	11,7±5 30,7	17,6±4 9,2	2,7±7 11,9	–	–	–	13,1±7 6,0	161±8 19,3	15±3 10,5	0

Euonymus sacrosancta	17,4±4 / 15,3	10,5±2 / 16,8	8,5±1 / 6,1	18,6±1 / 20,1	24,5±2 / 6,3	11,6±1 / 4,2	–	–	–	3,1±2 / 12,3	179±5 / 23,1	18±2 / 16,0	0
Juniperus sabina	3,5±2 / 9,9	–	13,5±3 / 11,2	–	–	–	–	–	–	6,1±6 / 1,8	156±5 / 21,4	–	0
Juniperus rigida	28,4±3 / 17,0	16,4±7 / 29,0	9,5±2 / 7,4	30,6±1 / 1,7	4,5±2 / 10,0	17,55±1 / 5,3	–	–	–	10,1±2 / 2,2	169±3 / 19,3	13±5 / 11,0	– 0,08
Juniperus sargentii	3,5±4 / 24,3	18,5±10 / 25,5	20,5±4 / 17,8	15,7±15 / 21,6	16,6±5 / 7,7	22,6±15 / 13,3	–	–	–	8,1±5 / 2,1	158±5 / 23,2	8±6 / 6,3	– 0,01
Prinsepia sinensis	10,4±2 / 16,2	24,4±6 / 28,1	23,4±3 / 18,6	15,6±5 / 7,2	13,5±3 / 9,8	25,5±1 / 4,5	1,9±3 / 3,8	15,8±2 / 3,2	6,9±4 / 6,1	7,1±1 / 1,0	180±6 / 12,1	13±4 / 15,3	– 0,2
Sorbocotoneaster pozdnjakovii	17,4±3 / 21,1	24,4±3 / 18,7	3,5±3 / 14,4	23,6±3 / 4,5	23,5±1 / 5,1	9,6±1 / 4,3	13,8±1 / 1,7	15,8±3 / 6,0	29,8±3 / 4,3	23,9±2,6 / 2,6	159±6 / 24,3	18±4 / 14,8	– 0,2
Menispermum dahuricum	28,4±3 / 14,9	–	30,5±2 / 7,3	3,9±8 / 11,2	–	–	–	28,8±4 / 5,9	20,9±3 / 4,1	27,9±2 / 2,3	151±4 / 12,3	–	0
Myricaria bracteata	16,5±6 / 10,1	12,5±1 / 1,9	27,5±3 / 4,8	12,6±3 / 7,6	22,5±5 / 8,5	16,6±8 / 5,3	18,8±6 / 3,4	9,9±6 / 4,3	18,9±2 / 1,7	7,1±3 / 2,1	144±5 / 12,1	26±4 / 8,3	0,02
Rosa spinosis-sima	1,5±3 / 13,1	1,6±4 / 5,2	17,5±2 / 8,2	26,7±11 / 16,0	19,6±5 / 12,1	2,8±5 / 8,9	13,8±10 / 11,7	27,8±5 / 7,1	10,9±8 / 10,8	9,1±6 / 5,4	161±6 / 19,3	44±3 / 8,9	0,01
Spiraea trilobata	24,4±3 / 14,9	17,5±5 / 15,4	8,5±2 / 9,5	25,8±9 / 12,8	31,5±5 / 14,0	14,6±4 / 9,2	3,1±2 / 1,3	6,9±5 / 6,9	25,9±3 / 3,3	13,1±8 / 6,2	172±5 / 11,4	15±4 / 6,8	0
Tilia sibirica	2,5±4 / 19,3	3,6±3 / 8,7	22,5±3 / 9,2	18,6±2 / 5,2	29,6±4 / 3,7	13,7±2 / 4,6	15,9±12 / 10,5	16,8±4 / 6,9	6,9±2 / 3,4	9,1±2 / 6,9	160±8 / 16,4	15±4 / 8,4	– 0
Tilia cordata	28,4±2 / 13,6	4,6±4 / 10,9	22,5±2 / 8,3	26,6±3 / 8,1	28,6±4 / 7,3	10,7±6 / 9,2	28,9±6 / 5,1	17,8±5 / 9,0	12,9±3 / 5,0	7,1±1 / 1,2	163±2 / 8,6	13±5 / 5,6	0

*В числителе – средняя дата наступления фазы развития ± квадратическое отклонение; в знаменателе – коэффициент вариации.

Средний период вегетации для древесных растений в природных условиях Хакасии, как правило, 165 дней. Более продолжительным периодом вегетации характеризуются *Cotoneaster alaunicus* и *Prinsepia sinensis*, у них вовремя завершается рост побегов, поэтому обмерзаний не наблюдается (табл. 2). У таких вечнозеленых растений, как *Juniperus sabina, Juniperus sargentii, Juniperus rigida* и *Euonymus nana*, конец вегетации отмечается с установлением устойчивых отрицательных температур.

Показатели фенологической атипичности свидетельствуют об оптимуме условий, в которых редкие виды находятся, т. к. все значения стремятся к нулю или равны ему (не зависимо + или –, табл. 2). Все характеризуемые древесные растения находятся в верхней (+0) или в нижней (–0) половине области нормы, или оптимуме для реализации фенологических фаз роста и развития. Циклы развития соответствуют вегетационному периоду места интродукции. Лишь условия вегетационного сезона разных лет и условия выращивания корректируют ежегодные сроки прохождения фенологических фаз. У большинства редких видов показатели квадратического отклонения имеют очень низкие значения, что свидетельствует о стабильности наступления фенологических фаз.

Учитывая показатели зимостойкости, особенности ритма развития, наличие самосева и способы размножения, изучаемым видам присваивали интродукционный балл (табл. 1). Такие виды, как *Armeniaca mandshurica, Cotoneaster lucidus, Cotoneaster alaunicus, Euonymus sacrosancta, Myricaria bracteata, Prinsepia sinensis, Rosa spinosissima, Spiraea trilobata, Tilia sibirica, Tilia cordata* (47,6 %), имеют 5-й балл. Они развиваются нормально, вполне зимостойки и завязывают полноценные семена. Интродукционный балл 4 имеют также 47,6 % видов. Это растения, проходящие полный цикл развития, но подмерзающие в отдельные годы или не формирующие полноценные семена или вообще их не образующие (*Amygdalus pedunculata, Aristolochia manshuriensis, Deutzia glabrata, Euonymus nana, Juniperus sabina, Juniperus rigida, Juniperus sargentii, Betula maximowicziana, Betula raddeana, Sorbocotoneaster pozdnjakovii*). *Menispermum dahuricum* имеет 3-й балл интродукции, т. к. обмерзает каждый год.

На основе анализа показателей жизнеспособности древесных растений устанавливали их перспективность (в баллах/суммарно, табл. 3).

Вполне перспективными (I балл) являются 38,1 % редких и исчезающих растений дендрария. Они проходят полный цикл развития, зимостойки, цветут, отмечен самосев. Из них 25 % – деревья (*Tilia sibirica*, *Tilia cordata*) и 75 % – кустарники (*Cotoneaster alaunicus*, *Cotoneaster lucidus*, *Euonymus sacrosancta*, *Prinsepia sinensis*, *Sorbocotoneaster pozdnjakovii*, *Rosa spinosissima*).

Перспективными (II балл) являются также 38,1 %: деревья – 12,5 % (*Armeniaca mandshurica*); кустарники – 75,0 % (*Amygdalus pedunculata, Euonymus nana, Juniperus sargentii, Myricaria bracteata, Spiraea trilobata, Deutzia glabrata*), лианы – 12,5 % (*Aristolochia manshuriensis*). Данная группа растений объединяет виды, для полноценного роста и развития которых необходимо создавать специальные условия (посадка в заветренные места, полив). Большинство из них высоко декоративны, поэтому представляют интерес для использования при благоустройстве населенных территорий.

К менее перспективным (III балл) относятся 19,0 % видов. Это 2 вида берез – *Betula maximowicziana, Betula raddeana* и 2 вида кустарников – *Juniperus sabina, Juniperus rigida*. Применение данных растений предусматривает вегетативное размножение в связи с отсутствием семян.

Таблица 3

Оценка перспективности редких древесных растений дендрария института, балл

Название растения	Степень одревеснения побегов	Зимостойкость	Сохранение габитуса	Побегообразовательная способность	Наличие прироста	Репродуктивная способность	Способы размножения	Перспективность
Amygdalus pedunculata	15	20	10	5	5	20	3	II/78
Aristolochia manshuriensis	15	20	10	10	5	15	5	II/80
Armeniaca mandshurica	20	20	10	5	5	20	10	II/90
Betula maximowicziana	15	20	10	5	5	15	3	III/73
Betula raddeana	15	20	10	5	5	15	3	III/73
Cotoneaster alaunicus	20	25	10	5	5	25	10	I/100
Cotoneaster lucidus	20	25	10	5	5	25	10	I/100
Deutzia glabrata	15	15	10	10	5	25	10	II/90
Euonymus nana	15	20	10	10	5	15	5	II/80
Euonymus sacrosancta	20	20	10	10	5	25	7	I/87
Juniperus sabina	15	25	10	5	5	1	3	III/64
Juniperus rigida	20	20	10	1	5	15	3	III/74
Juniperus sargentii	20	25	10	5	5	15	3	II/83
Prinsepia sinensis	20	25	10	5	5	25	10	I/100
Sorbocotoneaster pozdnjakovii	20	25	10	5	5	25	7	I/97
Menispermum dahuricum	1	5	10	10	5	1	5	VI/37
Myricaria bracteata	10	20	10	10	5	25	10	II/90
Rosa spinosissima	20	25	10	5	5	25	7	I/97
Spiraea trilobata	15	20	10	5	5	25	7	II/87
Tilia sibirica	20	25	10	5	5	25	10	I/100
Tilia cordata	15	25	10	5	5	25	10	I/95

К неперспективным относится *Menispermum dahuricum.* Однако при поддержании необходимых для него условий произрастания он может цвести и формировать полноценные семена.

При подборе способов размножения для рекомендуемых видов установлено, что растения 1-й группы размножаются семенами и вегетативно. Во 2-й группе семена формируют лишь 37,5 %, остальные могут размножаться черенкованием.

Заключение

В результате многолетних исследований редких древесных видов выявлены их биологические особенности, которые позволяют применять данные растения для благоустройства селитебных территорий. Из вполне перспективных видов внедряются в производство *Deutzia glabrata, Prinsepia sinensis, Rosa spinosissima*, их можно использовать для групповых посадок и создания живых изгородей. Из перспективных – *Armeniaca mandshurica, Spiraea trilobata* – для одиночных и групповых посадок. Эти виды значительно расширят ассортимент растений, что придаст определенный колорит паркам и скверам городов и сел степной и лесостепной зон Хакасии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Зайцев Г.Н.* Фенология травянистых многолетников. М.: Наука, 1978. 149 с.

Zaytsev G.N. *Phenology of Perennial Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1978. 149 p.

2. *Жолобова О.О.* Сохранение редких и исчезающих видов растений в культуре *in vitro* и оценка уровня их внутривидового полиморфизма: дис. ... канд. биол. наук. Белгород, 2012. 153 с.

Zholobova O.O. *The Conservation of Rare and Endangered Plants in the Genetic Collections in vitro and Assessing the Level of Their Intraspecific Polymorphism*: Cand. Biol. Sci. Diss. Belgorod, 2012. 153 pp.

3. Интродукция растений природной флоры Сибири / науч. ред. А.Н. Куприянов, Е.В. Банаев. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2017. 495 с.

The Introduction of Plants of the Siberian Flora. Novosibirsk, GEO Publ., 2017. 495 p.

4. *Кравцова Л.П.* Изучение фенологических особенностей лекарственных растений семейства *Lamiaceae* Lindl. при интродукции в Хакасии // Вестн. ТвГУ. Сер.: Биология и экология. 2019. № 3(55). С. 123–129.

Kravtsova L.P. The Study of Phenological Characteristics of Medicinal Plants of the Family *Lamiaceae* Lindl. Introduced in the Republic of Khakasia. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya i ekologiya* [Bulletin of Tver State University. Series: Biology and Ecology], 2019, no. 3(55), pp. 123–129. DOI: https://doi.org/10.26456/vtbio104

5. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). М.: Т-во науч. изд. КМК, 2008. 854 с.

Red Data Book of the Russian Federation (Plants and Fungi). Moscow, KMK Publ., 2008. 854 p.

6. Красная книга Республики Хакасия. Редкие и исчезающие виды растений и грибов. Новосибирск: Наука, 2012. 287 с.

Red Data Book of the Republic of Khakassia. Rare and Endangered Species of Plants and Fungi. Novosibirsk, Nauka Publ., 2012. 287 p.

7. *Лапин П.И.* Значение исследований ритмики жизнедеятельности растений для интродукции // Бюл. Глав. ботан. сада. 1974. Вып. 91. С. 3–7.

Lapin P.I. Importance of Plant Life-Rhythm Study for Introduction. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Central Botanical Garden], 1974, iss. 91, pp. 3–7.

8. *Левина Р.Е.* Репродуктивная биология семенных растений: (обзор пробл.) М.: Наука, 1981. 96 с.

Levina P.E. *Reproductive Biology of Seed Plants: Review of the Issue*. Moscow, Nauka Publ., 1981. 96 p.

9. *Лиховид Н.И.* Редкие и исчезающие травянистые интродуценты в сухой степи Хакасии при орошении // Ботанические исследования в Азиатской России: материалы XI съезда Рус. ботан. о-ва. Барнаул: АзБука, 2003. Т. 3. С. 331–332.

Likhovid N.I. Rare and Endangered Introduced Plants in the Dry Steppe of Khakassia under Irrigation. *Botanical Studies in Asian Russia: Proceedings of the XI Meeting of the Russian Botanical Society*. Barnaul, AzBuka Publ., 2003, vol. 3, pp. 331–332.

10. *Лиховид Н.И.* Интродукция древесных растений в аридных условиях юга Средней Сибири. Абакан: Март, 2007. 288 с.

Likhovid N.I. *Introduction of Woody Plants in Arid Conditions of the South of Central Siberia*. Abakan, Mart Publ., 2007. 288 p.

11. *Лучник З.И.* Методика изучения интродуцированных деревьев и кустарников // Вопросы декоративного садоводства. Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1964. С. 6–22.

Luchnik Z.I. Methodology of Studying Introduced Trees and Shrubs. *Decorative Gardening Issues*. Barnaul, Altayskoye knizhnoye izdatel'stvo, 1964, pp. 6–22.

12. *Семенова Г.П.* Редкие и исчезающие виды флоры Сибири: биология, охрана. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2007. 407 с.

Semenova G.P. *Rare and Endangered Species of Siberian Flora: Biology and Protection*. Novosibirsk, Geo Publ., 2007. 407 p.

13. Сессия Регионального Совета ботанических садов Сибири и Дальнего Востока: информ. бюл. М.: Научтехлитиздат, 2019. Вып. 12(35). 159 с.

Session of the Regional Council of Botanical Gardens of Siberia and the Far East. *Newsletter*. Moscow, Nauchtekhlitizdat Publ., 2019, iss. 12(35). 159 p.

14. *Сорокин О.Д.* Прикладная статистика на компьютере. Краснообск: ГУП РПО СО РАСХН, 2004. 162 с.

Sorokin O.D. *Applied Statistics on the Computer*. Krasnoobsk, GUP RPO SO RASKhN Publ., 2004. 162 p.

15. *Черепанов С.К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). Санкт-Петербург: Мир и семья-95, 1995. 989 с.

Cherepanov S.K. *Vascular Plants of Russia and Neighboring States*. Saint Petersburg, Mir i sem'ya-95 Publ., 1995. 989 p.

16. *Шакина Т.Н.* Особенности размножения декоративных кустарников черенками в условиях г. Саратова // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2017. № 16. С. 327–331.

Shakina T.N. Features of Reproduction of Ornamental Shrubs by Cuttings in the Conditions of the City of Saratov. *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii* [Problems of Botany of South Siberia and Mongolia], 2017, no. 16, pp. 327–331.

17. Anderson G., Wyse Jackson P. A Review of the Effect of Climate Change in Ireland and the Development of an Institutional Policy and Role of the Institution, in Its Mitigation. *EuroGard V: Botanic Gardens in the Age of Climate Change: Programme, Abstracts, and Delegates*. Ed. by S. Lehvävirta, D. Aplin, L. Schulman. Helsinki, Botanic Garden of the University of Helsinki, 2009, p. 36.

18. *International Agenda for Botanic Gardens in Conservation*. Richmond, UK, Botanic Gardens Conservation International, 2012. 49 p. Available at: https://www.bgci.org/resources/bgci-tools-and-resources/international-agenda-for-botanic-gardens/ (accessed 14.04.20).

19. Oldfield S. Plant Conservation, Botanic Gardens and the International Agenda. *Proceedings of the 4th Global Botanic Gardens Congress, June 2010*. Dublin, 2010, pp. 1–6. Available at: https://www.bgci.org/files/Dublin2010/papers/Oldfield-Sara.pdf (accessed 14.04.20).

20. Ten Kate K., Laird S.A. *The Commercial Use of Biodiversity: Access to Genetic Resources and Benefit-Sharing*. London, Earthscan, 1999. 416 p.

21. Wood A., Stedman-Edwards P., Mang J. *The Root Causes of Biodiversity Loss*. London, Routledge, 2000. 416 p. DOI: https://doi.org/10.4324/9781315071688

EFFECTIVENESS OF INTRODUCTION OF RARE PLANTS IN THE ARBORETUM OF KHAKASSIA

Galina N. Gordeeva, *Candidate of Biology, Senior Research Scientist;*
ResearcherID: AAH-2491-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9225-3659
Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia, ul. Sadovaya, 5, s. Zelenoye, Ust-Abakansky District, Republic of Khakassia, 655132, Russian Federation;
e-mail: gordeeva.gal2011@yandex.ru

Abstract. According to the International Agenda for Botanic Gardens in Conservation about 500 species of woody plants, which represent six regions of the world, are conserved in the collection of the Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia. The arboretum is located in the dry steppe zone of the Republic of Khakassia. There are 44 species of trees, shrubs and lianas of different rarity. Many of them are beautifully flowering, and therefore can be used for landscaping. The aim of the work is summing up the introduction of rare and endangered plants for their further usage in the improvement of residential areas of the Khakasia steppe zone. The research objects are 21 species of rare plants of the arboretum of the Institute. The periods of phenological stages of species, their growth and development rhythm, winter hardiness, period and duration of flowering, and ways of reproduction were determined. As a result, an introduction point was given to each plant and its perspectivity was estimated. The average age of rare plants was 40.7 years. All studied plants are early growing (from April 10 to May 10). In new growing conditions 72 % of species pass through a full life cycle, 19 % flower, but do not bear fruit, 9 % do not flower. According to the flowering period, 53 % of rare shrubs are early flowering (May). The longest flowering period was found in 19 % of species. The main phenological stages of plants occur during the stable periods, the low level of standard deviation confirms it. Self-seeding is typical for 28 % of the studied species. In the arboretum conditions 42 % reproduce both by seeds and vegetatively; 33 % – vegetatively and 23 % – by seeds. The introduction point shows the degree of adaptation to the new environment. As a result, 10 species have 5 and 4 points (96 %), *Menispermum dahuricum*, which annually freezes to the soil level, has 3 points. Perspectivity of the studied plants was identified based on the analysis of their viability parameters: 4 % of species turned to be non-perspective while 20 % are less perspective. Long-term studies of the biological features of rare woody plants indicate that rather perspective (38 %) and perspective (38 %) of the plants can be used in the improvement of residential areas of Khakasia. New species are introduced into the production for single and group planting: *Deutzia glabrata*, *Armeniaca mandshurica*, *Prinsepia sinensis*, *Spiraea trilobata*, and *Rosa spinosissima.*

For citation: Gordeeva G.N. Effectiveness of Introduction of Rare Plants in the Arboretum of Khakassia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 24–36. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-24-36

Поступила 14.04.20 / Received on April 14, 2020

УДК 581.55+581.524.34
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-37-48

ASSESSMENT OF NATURAL AND FOREST RECLAIMED FORAGE LANDS IN SEMI-DESERT CONDITIONS IN SOUTHERN RUSSIA

Ludmila P. Rybashlykova*[1]*, *Candidate of Agriculture, Leading Research Scientist; ResearcherID: W-4197-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3675-6243*
Vladimir V. Lepesko*[2]*, *Candidate of Agriculture, Leading Research Scientist; ResearcherID: AAD-9953-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2111-9636*
[1]Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration, and Protective Afforestation, Russian Academy of Sciences, prosp. Universitetskiy, 97, Volgograd, 400062, Russian Federation; e-mail: ludda4ka@mail.ru
[2]Bogdinskaya Research Agroforestry Experimental Station, ul. BOS, 1, Kharabali, Astrakhan Region, 416010, Russian Federation

Abstract. Haphazard use of pastures has become one of the factors of disturbance of their natural vegetation. Therefore, forest reclamation works were carried out and significant areas of strip plantations of shrubs were created in the Caspian Sea region in the mid-20th century. In the arid zone of Russia, one of the most important tasks in the field of scientific provision of protective afforestation is the improvement of methods and techniques of arrangement, increasing longevity and environmental, agricultural, and utilitarian efficiency of plantations. This study aims to determine the long-term impact of afforestation on the functioning of pasture ecosystems. The influence of tree and shrub layer on biodiversity and productivity of vegetation cover of pastures was also studied. The research objects are plantations growing on the reclaimed pastures. The research is based on the materials of biomonitoring and field experiments using standard methods of forest inventory and geobotanical survey. Rectangular-shaped test plots of 0.25–0.30 ha were laid out for the study of forest plots. Test plots were used for a detailed description of the location, soil composition, time, method, and technology of plantation development, as well as a comprehensive assessment of the growth and longevity of tree and shrub crops. Data from key plots were used to study the successional processes of vegetation cover. The research results have shown that deep plowing preparation of soil to obtain high results in rooting, preservation, and growth of shrub species has an advantage over other soil preparation technologies in the semi-desert zone. It was found that the shrub layer up to 45 years old retains its productive and generative abilities. Pasture protection belts from *Haloxylon aphyllum* and reclamation and fodder plantations from *Krascheninnikovia ceratoides* and *Calligonum aphyllum* have a high cenosis potential and stability. In this case study, in semi-arid regions, afforestation with shrubs is the best way to improve and restore pastures.
For citation: Rybashlykova L.P., Lepesko V.V. Assessment of Natural and Forest Reclaimed Forage Lands in Semi-Desert Conditions in Southern Russia. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 37–48. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-37-48

Keywords: arid zone, brown soils, forest pastures, geobotanical descriptions, multi-layered structure of phytocenoses, reclaimed forage lands, semi-desert.

Introduction

Further development of sheep breeding within pastures of the arid zone is impossible without strengthening the forage base, which is based on the rational use of reclaimed and natural forage lands. Vegetation cover is closely related to natural conditions and the economic use of the territory. Natural semi-desert pastures in the

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

region are characterized by low yields (0.15–0.35 t/ha) [6, 15] and sharp differences in forage reserves by year and season [17], which restrains the rate of animal husbandry development.

Uncontrolled cattle grazing leads to the reduction and disappearance of valuable forage plants from the grass plantations (*Kochia prostrata* L., *Agropyron fragile* Roth., *Camphorosma lessisingii* Litv. and other species), destruction of the fertile soil layer, and development of land degradation [18, 20].

As a rule, low-value forage annual plants and pasture perennial weeds (*Peganum harmala* L., *Euphorbia virgate* Waldst. & Kit, *Anabasis aphylla* L.) settle in places where primary vegetation is destroyed, which leads to a reduction in forage reserves in pastures [13]. To prevent further deterioration of pastures, restore their natural productivity, and improve the quality of forage on pastures of the semi-desert zone, a set of measures is required to create systems of pasture protection and reclamation-forage plantations from the most valuable in terms of protective and forage function shrub and tree species [5, 11, 16].

Protective plantings create a more favorable zone for cattle grazing on pastures, the organization of grazing and load regulation is simplified [8].

Livestock keeping conditions are improving on forested pastures as forest plantations protect animals from heat, sun, dust storms, cold winds, and blizzards [4, 14].

Linear continuous strip plantations protect the pasture area from strong winds, which is important in cold weather conditions, since a decrease in wind speed moves the border of adverse cold from –4 to 0 °C, for example, from 4 m/s to 0 m/s [9]. However, in summer when it is calm, sheep are oppressed by overheating at an air temperature of 22–27 °C, and the oppression is noted at a higher temperature (25–29 °C) with a wind speed of 4 m/s.

The creation of savanna and diffusor-screen plantations diversifies the ecology of pasture spaces by forming zones with different air exchange intensities, light conditions, and temperatures in the habitat of grazing animals [9].

The research purpose was to determine the stability and current state of tree and shrub plantations and assess their ecological and reclamation impact on pastures in semi-desert conditions.

The study of the functioning of reclaimed pasture and forest-pasture ecosystems is of theoretical and practical importance in optimal and, especially, extreme conditions of the arid zone [7, 19].

Modern phytocenoses of natural pastures of the Astrakhan semi-desert develop according to the wormwood-ephemeral type. They are degraded and phytocenotically incomplete. Ecological niches of highly nutritious plants are occupied by low-value (analogous) species, which indicates the duration of the impact of adverse environmental factors.

Studies conducted within the territory of the studied region revealed forest pastures that have retained their functional purpose and have existed for about 50 years, which made it possible to assess the long-term reclamation effect.

Materials and methods

The studied territory belongs to the Caspian subprovince and the North Turanian province of the Afro-Asian desert region according to phytogeographical zoning, and, in geomorphological terms, it is a marine plain of Late Khvalyn age,

modified by the Baer knolls and Aeolian landforms, such as ridges, barkhans and semi-fixed dunes [10]. See the figure.

The proximity of the Caspian sea and the intersection of sandy areas from North-West to South-East by the Volga river has no noticeable mitigating effect. Total annual precipitation is 100–200 mm. Mainly, low-snowy winters prevail, the thickness of the snow cover does not exceed 10–15 cm. The continental climate is manifested in the amplitudes of summer, winter, and annual temperatures. The maximum temperature is +42 °C. The minimum relative humidity during the growing season of plants is reduced to 10 %. Evaporation is very high (950–1100 mm) and exceeds atmospheric precipitation by 5–7 times. The average number of days with dry winds is 113 with a probability of 100 % according to the data of the Kharabali hydrometeorological station.

Location of the study area

The assessment of successive changes was carried out within pasture areas of the arid zone, where phytoreclamation and forest reclamation works were performed in 1975–1980. The research objects are plantations growing on the reclaimed pastures. The Priselskiy pasture plot covers an area of 306 ha. Pasture protection strips consist of *Haloxylon aphyllum* Minkw. (106 ha, seedling planting in 1978), reclamation-forage strips of *Krascheninnikovia ceratoides* L. and *Calligonum aphyllum* Pall. (200 ha, seedling planting in 1978). The terrain is a hilly plain that belongs to typical brown sandy loam soils. The plant association is ephemeral, with *Artemisia lerchiana* Weber ex Stechm. growing singly.

The Sokolovskiy pasture plot (213 ha) is represented by a hilly plain. It has a network of pasture protection strips with an area of 103 ha planted in 1976 and an area of 110 ha of pasture plantations of 1978. The soil is brown desert-steppe saline sandy loam and light loam in a complex with solonetz of 10 %.

The strips are 3-row, located across the prevailing winds. The width of the aisle is 4 m. The plant association is multi-herbaceous (*Barbarea vulgaris* R. Br., *Poa bulbosa* L., *Elytrigia repens* L., *Artemisia arenaria* DC., solitary *A. lerchiana*).

The Railway pasture plot (390 ha) is defined by a flat inter-mound depression. Planting on an area of 60 ha was carried out by the forest reclamation station in 1977, pasture protection strips – 100 ha, and pasturable strips – 230 ha. The soil is brown, sandy loam. Ground water is not revealed at a depth of 5 m. Pasture protection strips are 3-row with a 4-meter aisle. The soil is prepared according to the deep plowing method. The main plant species is *Haloxylon aphyllum*. Three pasture strips of

Krascheninnikovia ceratoides were planted into an inter-band space of 150-meter wide in 1980. The plant association varies from montley grass to white wormwood.

The Roadside pasture plot covers an area of 430 ha (100 ha in 1979 and 330 ha in 1981). The forest pastures were created on the Baer knolls, the soil is brown saline, sandy loam of II and III forest-reclamation category (FRC) and light loam in combination with solonetz of 10 %. The spaces between the strips are 30 m. The plant association is wormwood-cereal (bluegrass).

The Cordon pasture plot consists of 8 pasture protection strips (100 ha). The strips are 3-row; the width of the aisles is 4 m. The planting was carried out in 1977. Deep plowing was used for forest pasture strips. The inter-strip spaces are 30 m. First, the pasture protection strips of *Haloxylon aphyllum* were laid out, and after 2 years the reclamation and forage strips of *Krascheninnikovia ceratoides* and *Calligonum aphyllum* were laid out. Standard seedlings and planting machines SLCh-1 and SSN-1 were used for planting. The terrain is a slightly hilly plain. The soil is brown and sandy. Areas of wind-drifted sand are found in places along the strips. The ground water was not detected at a depth of 4 m. The plant association is ephemeral (*Avena fatua* L., *Anisantha tectorum* L., *Poa bulbosa*, solitary *Artemisia lerchiana*).

Soil tillage for planting protective plantations on pasture plots was carried out according to the following options: continuous deep plowing to a depth of 40–45 cm; partial deep plowing in order to form rows to a depth of 40–45 cm using the deep-cut ploughing machine KPG-250, followed by plowing the aisles to a depth of 22–25 cm in the spring and summer period; regular solid plowing to a depth of 22–25 cm.

Field work on the study of successional processes, geobotanical description and accounting of vegetation productivity was carried out during geobotanical surveys, according to generally accepted methods and instructions [2]. Data from key plots were used to assess succession. Each plot was characterized by a detailed description of 4 sample plots (size 100 m^2) by plant species diversity and indicators of its changes (number of species, life forms, structure of above-ground phytomass of herbaceous layer). An assessment of tree and shrub layer was based on taxonomic and morphological evaluation in the field conditions on 5 trial plots of rectangular shape, 0.25–0.30 ha, where the average height, diameter, nature of preservation of species, % of flowering and fruiting specimens were recorded [1]. Classification of plantations according to the value of state indices is as follows: healthy 1–1.5; weakened 1.6–2.5; severely weakened 2.6–3.5; dying 3.6–4.5; dead more than 4.6.

The nomenclature of vascular plant species is based on the Cherepanov's summary [12].

Results and discussion

Monitoring of the current state of forest pastures on brown semi-desert soils and analysis of dynamics of successions of vegetation cover allows us to identify promising technologies restoration of degraded pastures, on the example of objects where the integrity and multi-layered structure of phytocenoses has been preserved.

High results of survival rate, integrity and growth of shrub species in all options of the experiment were obtained as a result of careful compliance with the technology of forest planting in the semi-desert zone, however, the undisputed advantages remain for the deep plowing preparation of soil [3]. The study results are presented in table 1.

Table 1

Survival rate (%) of shrubs in pasture reclamation plantations, Priselskiy pasture plot

Plant species assortment	Soil tillage method								
	Deep plowing			Flat-cut			Conventional		
	1978	1979	1980	1978	1979	1980	1978	1979	1980
Haloxylon aphyllum	96.4	38.5	89.2	92.4	67.2	70.1	91.1	65.4	–
Krascheninnikovia ceratoides	99.0	86.5	95.3	99.4	94.0	97.2	97.0	94.2	–
Calligonum aphyllum	95.0	97.3	97.1	97.0	95.8	–	93.0	94.1	–

Note: Planting was not carried out in the columns with a dash.

The low survival rate of *Haloxylon aphyllum* is explained by drying of the planting material during the deep plowing in 1979. Good indicators of survival rate of shrubs were also noted in other areas of the region in these years.

The results of 3-year observations of phytomass growth of shrub species showed that the maximum increase was observed in *Krascheninnikovia ceratoides* and *Haloxylon aphyllum* in pasture reclamation plantations in the second year of life. *Haloxylon aphyllum* can accumulate 0.7–0.9 t/ha of dry mass with moderate grazing (60 % increase), and *Krascheninnikovia ceratoides* can accumulate 0.8–1.0 t/ha, respectively. The yield of grassy vegetation was taken into account in inter-strip spaces and open semi-desert, along with the determination of shrub phytomass.

The yield of air-dry grass mass was 0.69, 0.52 and 0.37 t/ha on the pasture protected by forest strips on the Priselskiy pasture plot in 1978, 1979 and 1980, respectively, and on an open pasture (control plot) it was 2–3 times less: 0.38, 0.28 and 0.19 t/ha. Productivity was 0.61 t/ha in the system of pasture protective strips over a nine-year observation period (1978–1986), control – 0.36 t/ha. The increase in the yield of grasses under the protection of forest strips on the pasture plots was: by 0.17 t/ha – Cordon; by 0.21 t/ha – Sokolovskiy; by 0.11 t/ha – Railway.

After 2 years, the reclaimed plots (Priselskiy, Sokolovskiy, Railway and Roadside) were put into use after planting pasture protective strips. An intensive grazing of small cattle began in the amount of 1.5 ths heads during the growing season in disregard of enclosure pasturing. This had a negative impact on the growth of pasture grasses, and after 2 years, the yield of ephemeral plants was in control higher than in the inter-strip space of the Priselskiy pasture plot, since it was adjacent to the lands of the state forest fund. Cattle broke up the *Haloxylon aphyllum* plantings.

An analysis of the state of forest pastures revealed a change in the previous multi-layered structure, which lost the functional purpose of the following plots: Priselskiy in 1995, Sokolovskiy and Railway in 2000.

The Roadside and Cordon plots perform their functions due to their remoteness from populated areas (table 2).

Table 2

The state of shrub vegetation in pasture-protective and reclamation-forage plantations, 2003

Pasture plot	Species	Age, yrs	Average height, m	Preservation, %	Spring moistening of soil, cm		Ecological state
					In the strip	In the inter-strip space	
Cordon	*Haloxylon aphyllum*	23	2.5±0.05	53	65	57	2.0
Roadside	*Haloxylon aphyllum*	22	2.8±0.02	68	71	63	1.8
	Krascheninnikovia ceratoides	22	0.7±0.04	73	73	68	1.5

An assessment of successional changes over a 30-year period (2013 surveys) of the study area showed the state of the forest pastures (table 3).

Wormwood-cereals (bluegrass) associations are formed in the conditions of the Astrakhan semi-desert on pasture lands with a very low yield of about 0.3–0.4 t/ha in May, and after gazing and burning of vegetation in August – 0.06–0.2 t/ha. This is due to the vegetation cover degradation, which cannot be restored due to increased pasture load, low autumn moisture reserves in soil and increased temperature during the growing season. Biodiversity is very low on the plots (8–19 species).

Studies have shown that the Roadside and Cordon plots have great biodiversity, and they preserve the tree and shrub layer after 35 years. Saxaul strips were preserved by 30 % on the Roadside plot; their average height is 2.2 m. Within the Cordon plot, the average height of *Haloxylon aphyllum* is 2.4 m, the preservation is 45 % (table 4).

The observations have shown that an increase in phytomass yield in the forest-agrarian ecosystems that are being formed can compensate the loss of annual productivity in 10–15 years after forest reclamation due to desertification, and provide an increase in fertility of reclaimed landscapes with full environmentally safe implementation of the agricultural resource potential of the territories in the future.

A monitoring of forest pastures gave the following results in terms of the state of plantings and the yield of grasses (table 5, 6).

The yield of grasses is greater than in spring period and is 0.75 t/ha in May within the Cordon plot, and 0.80 t/ha on the Roadside plot (table 5). The composition is *Artemisia lerchiana* (about 82 %) and *Poa bulbosa* (10 %). The yield of herbs does not increase at the end of August due to the lack of rainfall during the growing season (more weed poisonous herbs appear).

The best growth conditions for grassy ve getation are formed in the 30 m wide inter-strip space between pasture protective strips due to the best microclimatic characteristics. The yield of natural pasture vegetation was higher by 0.22–0.27 t/ha in both the spring and autumn periods by years.

Table 3

Agroecological state of forest pastures of the Astrakhan semi-desert, 2013

Pasture plot	Year of succession	Analysis of current state				
		FRC, terrain, soil, salinization 1.5–2 m	Number of species, pcs	Composition of phytomass, %	Yield, t/ha	State of tree and shrub layer
Prisels-kiy	36	II and III FRC, wavy, sandy loam and light loam, slightly solonetz	8	Shrubs (*Krascheninnikovia ceratoides*) – 1 %; cereals – 20 %; *Artemisia lerchiana* – 19 %; motley grass – 45 %; Anabasis, etc. – 15 %	0.26±0.06	Tree layer died in 1995
Sokolov-skiy	36	II и III FRC, wavy, salty, sandy loam and light loam in a complex with solonetz (10 %)	9	Shrubs (*Krascheninnikovia ceratoides*) – 1 %; cereals – 29 %; *Artemisia arenaria* – 10 %; *Artemisia lerchiana* – 10 %; montley grass – 50 %	0.25±0.05	Tree layer died in 2000
Railway	35	II и III FRC, wavy, brown sandy loam	10	Shrubs (*Krascheninnikovia ceratoides*) – 3 %; cereals – 30 %; *Artemisia lerchiana* – 27 %; montley grass – 40 %	0.38±0.06	Tree layer died in 2000
Road-side	34	II и III FRC, wavy, sandy loam and light loam, slightly solonetz	19	Shrubs (*Krascheninnikovia ceratoides*) – 10 %; cereals – 30 %; *Artemisia lerchiana* – 30 %; montley grass – 30 %	0.59±0.16	Good and satis-fac-tory
Cordon	36	II FRC, wavy, brown sandy loam	14	Cereals – 50 %; *Artemisia lerchiana* – 20 %; montley grass – 30 %	0.47±0.09	Satis-fac-tory

Note: Classification of arid pastures. I FRC: desertified pastures with fine and medium barkhan sands and strongly eroded soils. II FRC: pastures on overgrown and weakly overgrown sands. III FRC: pastures with deflation-prone loamy-sandy soils. IV FRC: pastures on loamy and clayey deflation soils.

Table 4

Bioecological characteristics of tree species populations in forest pastures of the Astrakhan semi-desert, 2013

Pasture plot	Species	Age, yrs	Average height, m	Average diameter		Number of skeletal branches, pcs	Preservation, %	Ecological state
				Crown, m	Trunk, cm			
Roadside	*Haloxylon aphyllum*	34	2.2±0.02	1.4±0.04	12.5±0.8	6	30	2
Cordon		36	2.4±0.04	1.6±0.09	14.5±1.2	7	45	2

Note: The classification of plantings according to the value of state indices is as follows: healthy 1–1.5, weakened 1.6–2.5, severely weakened 2.6–3.5, dying 3.6–4.5, dead > 4.6.

A survey of forest pastures in the spring of 2007–2010 showed that forage plants of various species predominate in pastures due to the protection strips, while species diversity is poorer in open pastures. Mainly, the following forage plants are represented: *Alyssum desertorum* Stapf., *Anisantha tectorum*, *Kochia prostrata*, *Poa bulbosa*, *Elytrigia repens*, *Setaria viridis* L., *Ceratocarpus arenarius* L., *Artemisia lerchiana* under the protection of 30-year-old strips of *Saxaula aphyllum*.

Table 5

Yield of natural vegetation on pastures (2002–2005)

Year of research	Dry weight, t/ha		Deviation from control
	Inter-strip space	Open pasture (control)	
Cordon pasture plot			
2002	1.66 / 0.18	1.45 / 0.12	0.22 / 0.06
2003	0.17 / 0.09	0.12 / 0.05	0.05 / 0.04
2004	0.84 / 0.8	0.83 / 0.65	0.01 / 0.15
2005	0.75 / 1.0	0.60 / 0.72	1.15 / 0.27
Roadside pasture plot			
2003	0.18 / 0.13	0.12 / 0.07	0.06 / 0.06
2004	0.82 / 0.41	0.60 / 0.35	0.22 / 0.06
2005	0.80 / 0.74	0.69 / 0.67	0.11 / 0.07

Note: Spring yield of herbs in the numerator (May); and denominator (August).

A wormwood-ephemeral association with inedible plants (*Anabasis aphylla* L., etc.) prevails in open pastures (control).

The distribution of phytomass by layers during the research period is presented in Table 6.

Table 6

Productivity of grasses under the protection of RFP and open steppe in the ground-level aerotope of pasture phytocenosis (May 2007–2010)

Year	Air-dry weight, t/ha					
	Total		Edible		Inedible	
	0–14 cm	15–30 cm	0–14 cm	15–30 cm	0–14 cm	15–30 cm
2007	0.19/0.15	0.21/0.08	0.14/0.12	0.16/0.06	0.05/0.03	0.05/0.02
2008	0.41/0.23	0.17/0.22	0.28/0.17	0.12/0.19	0.12/0.06	0.04/0.03
2009	0.38/0.22	0.14/0.11	0.25/0.16	0.07/0.08	0.13/0.06	0.06/0.03
2010	0.32/0.26	0.13/0.10	0.21/0.15	0.07/0.06	0.11/0.11	0.06/0.04

Note: RFP – reclamation and forage plantations; in the numerator – the yield of pastures under the protection of RFP; in the denominator – the yield of pastures in the open steppe.

The yield of grasses in 2009 is less than in 2008, and in 2010 it is even lower due to the dry spring.

At present, the Priselskiy plot is 70 % plowed for vegetable crops. *Haloxylon aphyllum* is preserved on the tops of the Baer knolls. The state is satisfactory.

The Cordon plot retains reclamation functions on the lands of the state forest fund. The state of *Haloxylon aphyllum* strips is satisfactory.

Analysis of species composition and life forms of forest pastures showed that under extremely arid conditions and soil mobility, unregulated intensive grazing, the tree layer begins to thin out quickly. Up to 40 years, only clumps or single specimens survive. However, they play an important zoogenic and phytogenic role, contributing to the stability of plant communities. The shrub layer retains high productive and generative capacities for a long time (up to 45 years) on the Cordon plot.

Conclusion

In General, it should be noted that the positive impact is observed everywhere in previously phytoreclamed areas for 34–36 years of succession changes.

Assessing the impact of the tree and shrub layer on biodiversity, it is necessary to distinguish forest pastures: the Roadside plot and the Cordon plot (14–19 species), where pasture protection strips of *Haloxylon aphyllum* and reclamation-forage plantations of *Krascheninnikovia ceratoides* and *Calligonum aphyllum* were planted.

Comparing the dynamics of composition and structure of ecological groups of forest pastures of the arid zone, it should be noted that the decrease in the proportion of biomass of forage species revealed everywhere in case of low moisture reserves due to the reduction of rainfall during October – December 2 times (by 30 mm) against the middle annual indicators, and also an increase in the load onto these areas due to a lack of forage in the neighboring pastures, where very low yields have been observed for 10 years.

These environmental factors led to a decrease in forage weight from 80–90 % to 40–50 %. At the same time, there was a sharp increase in the proportion of poisonous species from 1–3 % to 8–11 %, as well as ruderal species. The forecast of successions should be expected to be unfavorable, i.e. the further dominance of species that are not suitable for animals is probable. Phytocenoses will be formed as ephemeral and montley grasses, where inedible species will play a protective role. Therefore, it is necessary to carry out the phytoreclamation and forest reclamation work urgently.

The conducted research made it possible to assess the long-term reclamation effect. It showed that the advantage of created forest pastures is manifested not only in terms of increasing the phytoproductivity of forest-reclaimed territories, but also in terms of increasing biodiversity, forming more stable populations and phytocenoses, which contribute to prolonging a productive longevity and create more sustainable agricultural landscapes.

REFERENCES

1. Агролесомелиорация / под ред. А.Л. Иванова, К.Н. Кулика. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. 746 с.

Agroforestry. Ed. by A.L. Ivanov, K.N. Kulik. Volgograd, VNIALMI Publ., 2006. 746 p.

2. Агроэкология / под ред. В.А. Черникова, А.И. Черкеса. М.: Колос, 2000. 536 с.

Agroecology. Ed. by V.A. Chernikov, A.I. Cherkes. Moscow, Kolos Publ., 2000. 536 p.

3. *Асмачкин А.П., Лепеско В.В., Терюков А.Г.* Состояние и перспективы развития защитного лесоразведения в Астраханской области. Волгоград, 1989. 155 с.

Asmachkin A.P., Lepesko V.V., Teryukov A.G. *State and Prospects for the Development of Protective Afforestation in the Astrakhan Region*. Volgograd, 1989. 155 p.

4. *Вдовенко А.В.* Экологические проблемы пастбищного животноводства Северо-Западного Прикаспия // Агро XXI. 2012. № 7-9. С. 45–47.

Vdovenko A.V. Environmental Problems of Pasture Cattle Breeding in the North-Western Caspian Region. *Agro XXI*, 2012, no.7-9, pp. 45–47.

5. *Крючков С.Н., Маттис Г.Я.* Лесоразведение в засушливых условиях. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2014. 301 с.

Kryuchkov S.N., Mattis G.Ya. *Afforestation in Arid Conditions*. Volgograd, VNIALMI Publ., 2014. 301 p.

6. *Кулигин С.М.* Вегетативная продуктивность, качественная характеристика травянистых растений и мелиоративно-кормовых насаждений на пастбищах Астраханского Заволжья // Бюл. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та агролесомелиорации. 1985. № 1(44). С. 56–58.

Kuligin S.M. Vegetative Productivity, Qualitative Characteristics of Herbaceous Plants and Reclamation-Forage Plantations in Pastures of the Astrakhan Transvolga Region. *Byulleten' Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta agrolesomelioratsii*, 1985, no. 1(44), pp. 56–58.

7. *Манаенков А.С.* Лесомелиорация арен засушливой зоны. 2-е изд., перераб. и доп. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. 428 с.

Manaenkov A.S. *Forest Reclamation of Sandy Terraces of Arid Zone*. Volgograd, FRC of Agroecology RAS Publ., 2018. 428 p.

8. *Озолин Г.П.* Древесные и кустарниковые породы, применяемые в защитном лесоразведении юго-восточных районов страны // Агролесомелиорация. М.: Лесн. пром-сть, 1979. С. 132–148.

Ozolin G.P. Tree and Shrub Species Used in Protective Afforestation of the South-Eastern Regions of the Country. *Agroforestry*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979, pp. 132–148.

9. *Петров В.И., Фомичев Г.Д., Васильев Ю.И.* Новые виды защитных лесонасаждений для целей животноводства // Бюл. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та агролесомелиорации. 1985. № 1(44). С. 27–30.

Petrov V.I., Fomichev G.D., Vasil'yev Yu.I. New Types of Protective Forest Plantations for Cattle Breeding Purposes *Byulleten' Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta agrolesomelioratsii*, 1985, no. 1(44), pp. 27–30.

10. *Рыбашлыкова Л.П., Беляев А.И., Пугачёва А.М.* Мониторинг сукцессионных изменений пастбищных фитоценозов в «потухших» очагах дефляции Северо-Западного Прикаспия // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14, № 4. С. 78–85.

Rybashlykova L.P., Belyaev A.I., Pugacheva A.M. Monitoring Successional Changes in Pasture Phytocenoses in in 'Exhausted' Areas of Deflation in the North-West Caspian Region. *Ûg Rossii: èkologiâ, razvitie* [South of Russia: ecology, development], 2019, vol. 14, no, 4 pp. 78–85. DOI: https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-4-78-85

11. Akhmedenov K.M. Analysis of the Afforestation Status in the Arid Conditions of Western Kazakhstan. *Biology Bulletin*, 2018, vol. 45, iss. 10, pp. 1153–1158. DOI: https://doi.org/10.1134/S1062359018100023

12. Czerepanov S.K. *Vascular Plants of Russia and Adjacent States (the Former USSR)*. Cambridge, Cambridge University Press, 2007. 532 p.

13. Gamoun M., Hanchi B., Neffati M. Dynamic of Plant Communities in Saharan Rangelands Tunisia. *Arid Ecosystems*, 2012, vol. 2, iss. 2, pp. 105–110. DOI: https://doi.org/10.1134/S2079096112020060

14. Kulik K.N., Barabanov A.T., Manaenkov A.S. Forecasting the Development of Protective Afforestation in Russia until 2020. *Studies on Russian Economic Development*, 2015, vol. 26, iss. 4, pp. 351–358. DOI: https://doi.org/10.1134/S1075700715040073

15. Lepesko V.V., Belyaev A.I., Pleskachev Yu.N., Pugacheva A.M., Rybashlykova L.P. Monitoring the State and Ecological Ameliorative Effect of Tree and Shrub Coulisse and Row Plantings on Pastures in the Arid Conditions of the Northern Caspian. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 341, art. 012103. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012103

16. Padilla F.M., Pugnaire F.I. The Role of Nurse Plants in the Restoration of Degraded Environments. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, vol. 4, iss. 4, pp. 196–202. DOI: https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004[0196:TRONPI]2.0.CO;2

17. Radochinskaya L.P., Kladiev A.K., Rybashlykova L.P. Production Potential of Restored Pastures of the Northwestern Caspian. *Arid Ecosystems*, 2019, vol. 9, iss. 1, pp. 51–58. DOI: https://doi.org/10.1134/S2079096119010086

18. Sapanov M.K, Sizemskaya M.L., Akhmedenov K.M. Reclamation Stages and Modern Use of Arid Lands in the Northern Caspian Region. *Arid Ecosystems*, 2015, vol. 5, iss. 3, pp. 188–193. DOI: https://doi.org/10.1134/S2079096115030105

19. Yan Q., Zhu J., Zheng X., Jin C. Causal Effects of Shelter Forests and Water Factors on Desertification Control during 2000–2010 at the Horqin Sandy Land Region, China. *Journal of Forestry Research*, 2015, vol. 26, iss. 1, pp. 33–45. DOI: https://doi.org/10.1007/s11676-014-0012-x

20. Zethof J.H.T., Cammeraat E.L.H., Nadal-Romero E. The Enhancing Effect of Afforestation over Secondary Succession on Soil Quality under Semiarid Climate Conditions. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 652, pp. 1090–1101. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.235

ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ И ЛЕСОМЕЛИОРИРОВАННЫХ КОРМОВЫХ УГОДИЙ В УСЛОВИЯХ ПОЛУПУСТЫНИ НА ЮГЕ РОССИИ

Л.П. Рыбашлыкова*[1]*, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр.; *ResearcherID: W-4197-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3675-6243*
В.В. Лепеско*[2]*, канд. с.-х. наук, вед. науч. сотр.; *ResearcherID: AAD-9953-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2111-9636*
[1]Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, просп. Университетский, д. 97, г. Волгоград, Россия, 400062; e-mail: ludda4ka@mail.ru
[2]Богдинская научно-исследовательская агролесомелиоративная опытная станция, ул. БОС, д. 1., г. Харабали, Астраханская область, Россия, 416010

Аннотация. Бессистемное использование пастбищ стало одним из факторов нарушения их естественной растительности. Поэтому в Прикаспийском регионе в середине XX в. были проведены лесомелиоративные работы и созданы значительные площади полосных насаждений из кустарников. На территории аридной зоны России одной из важнейших задач в области научного обеспечения защитного лесоразведения является совершенствование методов и приемов обустройства, повышение долговечности, экологической, сельскохозяйственной и утилитарной эффективности насаждений. Исследование направлено на определение долгосрочного воздействия облесения на функционирование пастбищных экосистем. Также было изучено влияние древесно-кустарникового яруса на биоразнообразие, продуктивность растительного покрова пастбищ. Объектом исследования стали насаждения лесных полос на мелиорированных пастбищах. Использованы материалы биомониторинга, геоботанической съемки и полевых опытов с применением типовых методик лесной таксации. Закладывали пробные площади прямоугольной формы 0,25–0,30 га. Проводили подробное описание местоположения участка, состава почвы, времени, способа и технологии создания насаждений, а также комплексную оценку роста и долговечности древесно-кустарниковых культур. Изучение сукцессионных процессов растительного покрова осуществляли с применением данных ключевых участков. Результаты показали, что в зоне полупустыни для обеспечения высокой приживаемости, сохранности и роста кустарниковых пород при различных технологиях подготовки почвы преимущество остается за плантажной методикой. Как следует из опытов, кустарниковый ярус до 45 лет сохраняет продукционные и генеративные способности. Высоким ценозообразующим потенциалом и устойчивостью обладают пастбищезащитные полосы из *Haloxylon aphyllum* и мелиоративно-кормовые насаждения из *Krascheninnikovia ceratoides* и *Calligonum aphyllum*. В полузасушливых районах облесение с помощью кустарников является наилучшим способом улучшения и восстановления пастбищ.
For citation: Rybashlykova L.P., Lepesko V.V. Assessment of Natural and Forest Reclaimed Forage Lands in Semi-Desert Conditions in Southern Russia // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 37–48. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-37-48

Ключевые слова: аридная зона, бурые почвы, лесопастбища, геоботанические описания, многоярусная структура фитоценозов, мелиорированные кормовые угодья, полупустыня.

Поступила 23.03.20 / Received on March 23, 2020

УДК 630*5/6
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-49-58

МОДЕЛЬ ОБЪЕМА СТВОЛА ИВЫ: МЕТА-АНАЛИЗ

В.А. Усольцев*[1,2]*, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID: M-8253-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4587-8952*
А.А. Парамонов*[3, 4]*, мл. науч. сотр., аспирант; *ResearcherID: ABH-7242-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0961-221X*
С.В. Третьяков*[3, 4]*, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID: AAE-3861-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5982-3114*
С.В. Коптев*[3, 4]*, д-р с.-х. наук, проф.; *ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5402-1953*
И.С. Цепордей*[2]*, канд. с.-х. наук, науч. сотр.; *ResearcherID: AAC-5377-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4747-5017*
[1]Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: Usoltsev50@mail.ru
[2]Ботанический сад Уральского отделения РАН, ул. 8 Марта, д. 202 а, г. Екатеринбург, Россия, 620144; e-mail: Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru
[3]Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; e-mail: vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru
[4]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru

Аннотация. Прогнозы последствий глобального потепления стимулируют исследования углероддепонирующей способности растительного покрова. Ствол представляет собой основную часть биомассы дерева, и от точности характеристики объема ствола зависит возможность корректного мониторинга и предварительной оценки будущего состояния лесных ресурсов. В российском лесоустройстве ива не входила в число основных лесообразующих видов, и поэтому необходимости в разработке таксационных нормативов для нее не было. Однако в связи с возросшей актуальностью оценки углероддепонирующей функции лесов России и необходимостью учета вклада в углеродный баланс всех видов растительности возникла потребность в создании подобных нормативов. Это может быть обеспечено разработкой всеобщей модели (или таблицы), учитывающей морфологию ив в пределах всего рода *Salix* L. и построенной по опубликованным в разных регионах и странах данным. Объект исследования – данные об объемах стволов ивы, размещенные в свободном доступе в России, Казахстане, Болгарии и Норвегии в виде таблиц или регрессионных моделей. Насколько каждая локальная модель применима в других регионах неизвестно. Для снятия этой неопределенности нами использован мета-анализ как статистическая процедура, объединяющая результаты нескольких независимых исследований с целью нахождения общей закономерности. Получена универсальная модель объема стволов рода *Salix*, которая характеризуется высоким коэффициентом детерминации и может быть применена для оценки объема ствола любого вида данного рода с минимальными отклонениями от расчетных значений. Результаты направлены на повышение точности учета лиственных насаждений при проведении лесоустроительных и мониторинговых работ, таксации древостоев на постоянных и временных пробных площадях. Применение унифицированных нормативов при использовании, воспроизводстве, охране и защите древостоев ивы древовидной при всем многообразии ее видов позволит решить ряд практических вопросов.

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

Для цитирования: Усольцев В.А., Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В., Цепордей И.С. Модель объема ствола ивы: мета-анализ // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 49–58. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-49-58

Ключевые слова: род *Salix* L., объем ствола, всеобщая модель, мета-анализ, регрессионный анализ.

Введение

Основная часть биомассы дерева – это стволовая древесина, от точности оценки ее объема во многом зависит возможность корректного мониторинга и прогноза лесных ресурсов. Многочисленные модели и таблицы объема стволов для того или иного древесного вида разработаны на локальных эмпирических данных, их экстраполяция на регионы, расположенные в других лесорастительных условиях, может давать смещения оценок, следовательно, возникает вопрос о правомерности подобных заимствований и разработке обобщенных моделей и таблиц [10, 18].

Ситуация осложняется тем, что понятие объема ствола неоднозначное: в одних случаях в него включается весь ствол от пня до верхушки, в других учитывается лишь коммерческий объем, в который входит ствол, за исключением вершинной части, или добавляется объем ветвей либо пня. Чтобы оценки лесных ресурсов учеными разных стран были сопоставимыми, предпринимаются попытки гармонизации (согласования) объемных таблиц с помощью специальных корректировочных коэффициентов [16].

В российском лесоустройстве ива никогда не входила в число основных лесообразующих видов, ее ресурсы в данных Государственного учета лесного фонда отдельно не прописывались [4]. Необходимости разработки таксационных нормативов для этого растения не существовало, они отсутствовали в региональных и общероссийских (общесоюзных) справочниках. Однако в некоторых европейских странах и малолесном Казахстане учет ивовых (ветловых) насаждений осуществлялся, т. е. были и соответствующие таксационные нормативы.

Ива (ветла, ракита, лоза, лозина, верба, шелюга, краснотал, тальник) – *Salix* L. – самый многочисленный род древесных растений умеренных широт, насчитывает более 370 видов, произрастающих главным образом в прохладных областях Северного полушария, где ареал ее распространения заходит за полярный круг. В Северной Америке существует более 65 видов этого растения, из которых только 25 достигают размеров дерева (обычно высотой до 15 м), остальные представляют собой кустарники, однако и среди древовидных ив есть экземпляры высотой до 40 м и диаметром ствола более 0,5 м. В России наиболее часто встречаются 6 видов ивы: белая, или ветла (*S. alba* L.); трехтычинковая, или белотал (*S. triandra* L.); пятитычинковая, или чернотал (*S. pentandra* L.); козья, или бредина, ракита (*S. caprea* L.); пепельная (*S. cinerea* L.); остролистная, или шелюга, краснотал, верба (*S. acutifolia* Willd.).

В последнее время в связи с возросшей актуальностью оценки углероддепонирующей функции лесов Российской Федерации и необходимостью учета вклада в углеродный баланс всех видов растительности были разработаны объемные таблицы ивы древовидной для Северо-Запада нашей страны [8]. Однако применение этих региональных таблиц для всего ареала произрастания

ивы на территории России, как уже отмечалось, может дать существенные смещения в оценках. Род *Salix* отличается чрезвычайным видовым разнообразием, поэтому построение региональных таблиц для учета запаса ивовых насаждений потребует многих лет работы. Выходом может стать всеобщая модель (или таблица), учитывающая морфологию ив в пределах всего рода и построенная по опубликованным в разных регионах и странах данным.

Обычно информация об объеме стволовой древесины публикуется в виде регрессионных уравнений или таблиц, включающих в качестве входов таксационный диаметр и высоту дерева. Обобщение локальных ранее опубликованных уравнений и выведенных из них псевдо-данных (псевдо-наблюдений) относят к категории мета-анализа как метода синтеза данных как метода «анализа анализов» [15, 18]. Модели, выведенные на основании опубликованных ранее уравнений и являющиеся их синтезом, называют мета-моделями. Такой подход позволяет обойтись без получения оригинальных данных.

Основателем этого метода считается Джин Гласс [15]. Он был первым статистиком, который формализовал процедуру мета-анализа и ввел само это понятие. Несмотря на критику мета-анализа, такие его характеристики, как «упражнение в мега-глупости» [12], «гигантский шаг назад» [17] и «статистическая алхимия XXI века» [13], количество публикаций с применением этого метода непрерывно растет [19, 20], а область его использования охватывает диапазон от «астрономии до зоологии» [23]. Когда при анализе десятков научных работ обнаруживаются противоречия и взаимоисключающие выводы, то необходимость мета-анализа для снятия неопределенностей становится очевидной [15].

Цель исследования состоит в разработке унифицированной регрессионной модели объема ствола ивы (род *Salix*) посредством мета-анализа ранее опубликованных и «регенерированных» псевдо-данных, связанных с таксационным диаметром и высотой дерева.

Объекты и методы исследования

В мета-анализ включены данные шести 2-входовых таблиц объема стволов и одной регрессионной 2-факторной модели (табл. 1).

Не все опубликованные материалы по объему ствола ивы могут быть включены в анализ. В частности, регрессионные модели, разработанные в Румынии [14], имеют в качестве независимых переменных таксационные диаметр и высоту дерева, но зависимая переменная представлена суммарным объемом древесины ствола и ветвей. Не могут быть вовлечены в анализ также 2-факторные регрессионные модели объема ствола ивы козьей, разработанные в Словакии [22]: они предназначены для таксации молодых (до 12 лет) деревьев и поэтому вместо диаметра на высоте груди используют в качестве независимой переменной диаметр у основания ствола.

Опубликованы данные о запасах биомассы нескольких видов ив на единице площади в Центральном Черноземье России [1, 5], регрессионные модели биомассы ивы козьей по фракционному составу [22] и нормативы для оценки ее биомассы (листвы, ветвей и коры), поедаемой оленем благородным, составленные для Национального парка Словакии в Татрах [21], но во всех перечисленных публикациях данные об объеме ствола отсутствуют.

Таблица 1

Характеристика опубликованных исходных данных объема ствола ивы, включенных в мета-анализ*

№	Страна или регион	Источник	Форма представления данных	Диапазоны	
				диаметра на высоте груди, см	высоты дерева, м
1	Северо-Запад РФ	[8]	Таблица	1–22	2–18
2	Казахстан, пойма р. Урал (1)	[9]	Таблица	8–40	6–20
3	Казахстан, пойма р. Урал (2)	[2]	Дополненная таблица	8–48	6–23
4	Казахстан, пойма р. Иртыш (1)	[6]	Таблица	8–80	12–27
5	Казахстан, пойма р. Иртыш (2)	[3]	Дополненная таблица	8–80	12–27
6	Болгария	[7]	Таблица	4–50	13–27
7	Норвегия	[11]	Уравнение	5 и выше	–

*Видовая принадлежность ив в большинстве публикаций не была указана.

Табличные данные об объеме ствола, распределенные по ступеням таксационного диаметра, и о высоте дерева из первых 6 источников (табл. 1) обработаны нами с использованием стандартной программы регрессионного анализа согласно принятой структуре модели:

$$\ln V = a + b \ln D + c \ln H + d (\ln D \cdot \ln H),$$

где V – объем ствола в коре, м^3; D – диаметр ствола на высоте груди, см; H – высота дерева, м; a, b, c, d – регрессионные коэффициенты.

По мере уменьшения высоты дерева место замера диаметра ствола (обычно на высоте груди) смещается к апексу, простая 2-факторная аллометрия нарушается, тогда становится очевидной корреляция остатков в остаточной дисперсии. В результате этого в средней части диапазона диаметров расчетные значения зависимой переменной завышаются, а в верхней и нижней частях диапазона, напротив, занижаются. При введении в модель дополнительной переменной ($\ln D \cdot \ln H$) остаточная дисперсия становится равномерной.

Результаты исследования и их обсуждение

Зависимость объема ствола ивы козьей в Норвегии от таксационных диаметра и высоты дерева представлена не таблицей, а регрессионным уравнением, которое включает 4 независимые переменные в виде разных сочетаний D и H [11]. Поскольку подобная структура кардинально отличается от принятой нами, уравнение норвежской ивы было протабулировано по задаваемым ступеням D и H, и полученные мета-данные в количестве 50 определений вновь подвергнуты регрессионному анализу, но уже согласно приведенной выше модели. Сводка региональных мета-моделей представлена в табл. 2.

В результате объединения восстановленных мета-данных, по которым построены региональные модели (поз. 1–7 в табл. 2), и последующего регрессионного анализа объединенной совокупности в количестве 600 определений создана результирующая всеобщая мета-модель объема ствола для рода *Salix* (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика мета-моделей для объема ствола ивы

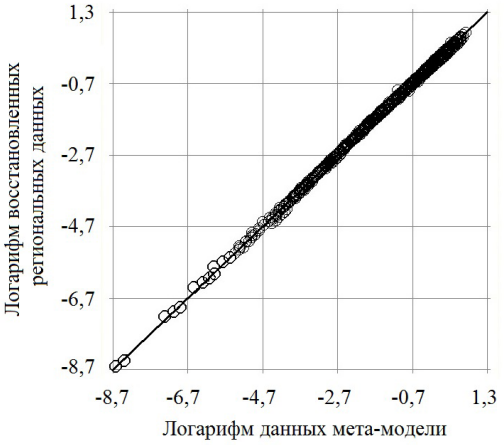
№*	Регрессионные коэффициенты мета-моделей				$adjR^2$**
	a	*b*	*c*	*d*	
1	–8,8893	1,8289	0,4601	0,0795	1,000
2	–9,0354	1,8174	0,5353	0,0710	0,999
3	–9,4245	1,9027	0,7258	0,0243	0,999
4	–9,8517	2,2148	0,8427	–0,0711	1,000
5	–9,7936	2,2030	1,8169	–0,0653	1,000
6	–9,3624	2,0049	0,6806	–0,0028	1,000
7	–10,7245	2,2834	1,2827	–0,1430	0,999
Всеобщая модель	–9,0235	1,8557	0,5738	0,0435	0,999

*Номера позиций те же, что в табл. 1; **$adjR^2$ – коэффициент детерминации, скорректированный на число переменных мета-моделей.

Полученная мета-модель объясняет 99,9 % варьирования региональных псевдо-данных (см. рисунок). Высокие значения коэффициента детерминации обусловлены тем, что некоторая доля варьирования зависимой переменной была удалена еще при первичном регрессионном анализе, поэтому мета-анализ и рассматривает не исходные данные, а псевдо-данные объема ствола [18]. Однако вследствие малой изменчивости полнодревесности ствола 2-факторные модели его объема, построенные по первичным данным диаметра и высоты ивы древовидной, характеризуются практически столь же высокой степенью детерминированности – 99,8 % [8].

Соотношение восстановленных региональных псевдо-данных объема стволов и данных всеобщей мета-модели

Ratio of restored regional pseudo-data of stem volume and data of the generic meta-model



Выполненный мета-анализ объема стволов лесообразующих видов Европы включал в себя зависимость объема ствола лишь от одной независимой переменной – таксационного диаметра. Полученные мета-модели объясняли варьирование региональных псевдо-данных для ели европейской, сосны обыкновенной и березы белой соответственно на 99,8; 99,6 и 98,2 % [18]. Несколько меньшие показатели детерминированности уравнений для европейских видов по сравнению с полученным нами показателем (99,9 %) объясняются однофакторной структурой модели, не учитывающей варьирование объема ствола в

связи с высотой дерева при одном и том же таксационном диаметре. Это подтвердил мета-анализ объема стволов куннингамии ланцетовидной (пихты китайской) в южных провинциях Китая по двум названным выше независимым переменным [24], выявивший более высокие показатели детерминации (98,7–99,0 %) по сравнению с моделью, учитывающей лишь таксационный диаметр (94,4–95,8 %).

Для практического использования полученная мета-модель протабулирована по задаваемым значениям таксационных диаметра и высоты ствола ивы (табл. 3).

Таблица 3

Таблица для определения объема ствола в коре ивы (род *Salix*) по высоте и диаметру ствола на высоте груди

D, см	*H*, м						
	4	8	12	16	20	24	28
2	0,00104	0,00161	0,00208	–	–	–	–
4	0,00375	0,00600	0,00791	0,00962	–	–	–
6	0,00795	0,0130	0,0173	0,0211	–	–	–
8	0,0136	0,0224	0,0300	0,0370	0,0434	–	–
10	0,0205	0,0342	0,0461	0,0570	0,0672	–	–
12	0,0288	0,0483	0,0655	0,0812	0,0960	0,110	–
14	0,0383	0,0648	0,0881	0,110	0,130	0,149	0,168
16	0,0491	0,0835	0,114	0,142	0,169	0,194	0,218
18	0,0610	0,104	0,143	0,179	0,212	0,244	0,275
20	0,0742	0,128	0,175	0,219	0,261	0,301	0,339
22	0,0886	0,153	0,210	0,264	0,314	0,363	0,410
24	0,104	0,180	0,249	0,312	0,373	0,431	0,486
26	0,121	0,210	0,290	0,365	0,436	0,504	0,570
28	0,139	0,242	0,334	0,421	0,504	0,583	0,660
30	0,157	0,275	0,382	0,482	0,577	0,668	0,756
32	0,178	0,311	0,432	0,546	0,654	0,758	0,859
34	–	0,349	0,486	0,614	0,737	0,854	0,969
36	–	0,389	0,542	0,686	0,824	0,956	1,085
38	–	0,431	0,602	0,762	0,916	1,063	1,207
40	–	–	0,664	0,842	1,012	1,176	1,336
42	–	–	–	0,926	1,114	1,295	1,471
44	–	–	–	1,013	1,220	1,419	1,613
46	–	–	–	1,105	1,331	1,549	1,761
48	–	–	–	1,200	1,446	1,684	1,916
50	–	–	–	–	1,566	1,825	2,077

Хотя полученная мета-модель объясняет 99,9 % варьирования региональных псевдо-данных, имеются систематические смещения последних отно-

сительно значений объема ствола ивы, полученных по мета-модели (табл. 4). Однако величина смещений в среднем составляет лишь 2 %, и ими можно пренебречь в случаях применения мета-модели при таксации ивовых насаждений в регионах России.

Таблица 4

Среднее смещение региональных псевдо-данных объема ствола ивы относительно значений, полученных табулированием мета-модели

Показатель	Северо-Запад РФ	Урал 1	Иртыш 1	Урал 2	Иртыш 2	Болгария	Норвегия
Среднее смещение	2,93	0,72	2,04	0,79	2,04	2,45	–2,16
Ошибка среднего смещения	±0,27	±0,52	±0,29	±0,41	±0,51	±0,25	±0,29

Заключение

Таким образом, на основе техники мета-анализа составлена таблица для определения объемов стволов ивы (род *Salix*) по их высоте и диаметру на высоте груди. Таблица характеризуется незначительными отклонениями объемов (около 2 %) от региональных значений и может быть использована для таксации ивовых насаждений на территории России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Горобец А.И.* Продуктивность естественных ценозов и перспективы плантационного выращивания ивы в Центральной лесостепи: автореф. дис. … д-ра биол. наук. Воронеж, 2019. 38 с.

Gorobets A.I. Productivity of Natural Coenoses and Prospects of Willow Plantation Growing in the Central Forest-Steppe: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Voronezh, 2019. 38 p.

2. *Гурский А.А., Токмурзин Т.Х.* Сортиментная таблица для ветловых древостоев поймы р. Урал. Вариант 3 // Сортиментные и товарные таблицы для лесов Казахстана / отв. ред. А.А. Макаренко. Ч. II. Алма-Ата: Кайнар, 1987. С. 151–153.

Gurskiy A.A., Tokmurzin T.Kh. Specimen Table for Willow Stands in the Ural River Floodplain. Option 3. *Specimen and Commodity Tables for Forests of Kazakhstan*. Ed. by A.A. Makarenko. Part II. Alma-Ata, Kainar Publ., 1987, pp. 151–153.

3. *Колтунова А.И., Макаренко А.А.* Сортиментная таблица для ветловых древостоев поймы р. Иртыш. Вариант 3 / отв. ред. А.А. Макаренко. Сортиментные и товарные таблицы для лесов Казахстана. Ч. II. Алма-Ата: Кайнар, 1987. С. 156–159.

Koltunova A.I., Makarenko A.A. Specimen Table for Willow Stands in the Irtysh River Floodplain. Option 3. Ed. by A.A. Makarenko. Specimen and Commodity Tables for Forests of Kazakhstan. Part II. Alma-Ata, Kainar Publ., 1987, pp. 156–159.

4. Лесной фонд России (по данным государственного учета лесного фонда по состоянию на 1 января 2003 г.): справ. М.: ВНИИЛМ. 2003. 640 с.

Forest Fund of Russia (on the Base of the State Accounting of the Forest Fund as of January 1, 2003): Handbook. Moscow, VNIILM Publ., 2003. 640 p.

5. *Логинова Л.А.* Продуктивность ивовых ценозов в Центральном Черноземье и перспективы создания энергетических плантаций: автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Воронеж, 2007. 19 с.

Loginova L.A. *Productivity of Willow Coenoses in the Central Chernozem Region and Prospects for Creating Energy Plantations*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Voronezh, 2007. 19 p.

6. *Макаренко А.А., Колтунова А.И.* Объемы и выход деловой древесины по категориям крупности для ветловых древостоев поймы р. Иртыш // Справочник по таксации лесов Казахстана / отв. ред. А.А. Макаренко. Алма-Ата: Кайнар, 1980. С. 251–252.

Makarenko A.A., Koltunova A.I. Volumes and Yield of Commercial Wood by Size Categories for Willow Stands of the Irtysh River Floodplain. *Handbook of Forest Valuation in Kazakhstan*. Ed. by A.A. Makarenko. Alma-Ata. Kainar Publ., 1980, pp. 251–252.

7. *Недялков С., Цанов Ц.* Разредна обемна таблица за високостъблени насаждения от върба (Разрядная объемная таблица для высокоствольных насаждений ивы) // Наръчник на таксатора (Справочник таксатора) / ред. Я. Порязов, Т. Тончев, И. Добричов. София: Булварк. 2004. С. 402–403.

Nedyalkov S., Tsanov Ts. Volume Table for Full-Grown Willow Stands. *Forest Mensuration Handbook*. Ed. by Ya. Poryazov, T. Tonchev, I. Dobrichov. Sofia, Bulwark Publ., 2004, pp. 402–403.

8. *Парамонов А.А., Третьяков С.В., Коптев С.В.* Таблицы объемов стволов по диаметру и высоте ивы древовидной в северотаежном районе // Сиб. лесн. журн. 2020. № 3. С. 73–79.

Paramonov A.A., Tret'yakov S.V., Koptev S.V. Tables of Stem Volume. *Sibirskij Lesnoj Zurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2020, no. 3, pp. 73–79. DOI: https://doi.org/10.15372/SJFS20200307

9. *Токмурзин Т.Х.* Объемы и выход деловой древесины по категориям крупности для ветловых древостоев поймы р. Урал // Справочник по таксации лесов Казахстана / отв. ред. А.А. Макаренко. Алма-Ата: Кайнар, 1980. С. 248–250.

Tokmurzin T.Kh. Volumes and Yield of Commercial Wood by Size Categories for Willow Stands in the Ural River Floodplain. *Handbook of Forest Valuation in Kazakhstan*. Ed. by A.A. Makarenko. Alma-Ata, Kainar Publ., 1980, pp. 248–250.

10. *Усольцев В.А., Колчин К.В., Азаренок В.А.* О возможностях применения всеобщих и региональных аллометрических моделей при оценке фитомассы деревьев ели // Аграр. вестн. Урала. 2017. № 06(160). С. 33–37.

Usoltsev V.A., Kolchin K.V., Azarenok V.A. On Possibilities for Application of Generic and Regional Allometric Models When Estimating Spruce Tree Biomass. *Agrarnyj vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2017, no. 06(160), pp. 33–37.

11. Braastad H. Volumtabeller for bjørk [Volume Tables for Birch]. *Meddelelser fra det Norske Skogforsøksvesen*, 1966, vol. 21, no. 1, pp. 23–78.

12. Eysenck H.J. An Exercise in Mega-Silliness. *American Psychologist*, 1978, vol. 33(5), art. 517. DOI: https://doi.org/10.1037/0003-066X.33.5.517.a

13. Feinstein A.R. Meta-Analysis: Statistical Alchemy for the 21st Century. *Journal of Clinical Epidemiology*, 1995, vol. 48, iss. 1, pp. 71–79. DOI: https://doi.org/10.1016/0895-4356(94)00110-C

14. Giurgiu V. O expresie matematica unica a relatiei diametru – înaltime – volum, pentru majoritatea speciilor forestiere din Romania [An Unique Mathematical Expression of the Relation Diameter-Height-Volume for Most of the Romanian Forest Tree Species]. *Silvicultura si Exploatarea Padurilor*, 1974, vol. 89, no. 4, pp. 173–178.

15. Glass G.V. Primary, Secondary, and Meta-Analysis of Research. *Educational Researcher*, 1976, vol. 5, no. 10, pp. 3–8. DOI: https://doi.org/10.2307/1174772

16. Gschwantner T., Alberdi I., Balázs A., Bauwens S., Bender S., Borota D. et al. Harmonisation of Stem Volume Estimates in European National Forest Inventories. *Annals of Forest Science*, 2019, vol. 76, art. 24. DOI: https://doi.org/10.1007/s13595-019-0800-8

17. Markow T.A., Clarke G.M. Meta-Analysis of the Heritability of Developmental Stability: A Giant Step Backward. *Journal of Evolutionary Biology*, 1997, vol. 10, iss. 1, pp. 31–37. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.1997.10010031.x

18. Muukkonen P. Generalized Allometric Volume and Biomass Equations for Some Tree Species in Europe. *European Journal of Forest Research*, 2007, vol. 126, iss. 2, pp. 157–166. DOI: https://doi.org/10.1007/s10342-007-0168-4

19. Nakagawa S., Poulin R. Meta-Analytic Insights into Evolutionary Ecology: An Introduction and Synthesis. *Evolutionary Ecology*, 2012, vol. 26, iss. 5, pp. 1085–1099. DOI: https://doi.org/10.1007/s10682-012-9593-z

20. O'Rourke K. An Historical Perspective on Meta-Analysis: Dealing Quantitatively with Varying Study Results. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 2007, vol. 100, iss. 12, pp. 579–582. DOI: https://doi.org/10.1177/0141076807100012020

21. Pajtík J., Konôpka B. Quantifying Edible Biomass on Young Salix caprea and Sorbus aucuparia Trees for *Cervus elaphus*: Estimates by Regression Models. *Austrian Journal of Forest Science*, 2015, Nr. 2, S. 61–80.

22. Pajtík J., Konôpka B., Šebeň V. *Mathematical Biomass Models for Young Individuals of Forest Tree Species in the Region of the Western Carpathians*. Zvolen, National Forest Centre – Forest Research Institute Zvolen, 2018. 89 p.

23. Petticrew M. Systematic Reviews from Astronomy to Zoology: Myths and Misconceptions. *British Medical Journal*, 2001, vol. 322, pp. 98–101. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.322.7278.98

24. Xia Z.-S., Zeng W.-S., Znu S., Luo H.-Z. Construction of Tree Volume Equations for Chinese Fir Plantations in Guizhou Province, Southwestern China. *Forest Science and Practice*, 2013, vol. 15, iss. 3, pp. 179–185. DOI: https://doi.org/10.1007/s11632-013-0304-9

GENERIC MODEL OF WILLOW STEM VOLUME: A META-ANALYSIS

Vladimir A. Usoltsev*[1,2]*, *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: M-8253-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4587-8952*
Andrey A. Paramonov*[3,4]*, *Junior Research Scientist, Postgraduate Student; ResearcherID: ABH-7242-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0961-221X*
Sergey V. Tretyakov*[3,4]*, *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: AAE-3861-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5982-3114*
Sergey V. Koptev*[3,4]*, *Doctor of Agriculture, Prof.; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5402-1953*
Ivan S. Tsepordey*[2]*, *Candidate of Agriculture, Research Scientist; ResearcherID: AAC-5377-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4747-5017*
[1]Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy Trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: Usoltsev50@mail.ru
[2]Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202a, Yekaterinburg, 620144, Russian Federation; e-mail: Usoltsev50@mail.ru, ivan.tsepordey@yandex.ru
[3]Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; e-mail: vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru
[4]Northern (Arctic) Federal University Named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: vagner93@inbox.ru, s.v.tretyakov@narfu.ru, s.koptev@narfu.ru

Abstract. Current scenarios of the consequences of global warming stimulate research on the carbon-depositing capacity of vegetation cover. The stem is the main part of the tree biomass, and the accuracy of its volume assessment determines the possibility of correct monitoring and forecasting of forest resources. In the Russian forest management system, willow was not among the main forest-forming species, and therefore there was no need to develop valuation standards for it. However, due to the increased relevance of assessing the carbon-deposing function of Russian forests and the requirement to take into account the contribution to the carbon balance of all types of vegetation, there is a necessity to develop such standards. The solution can be found in the development of a generic model (or table) that takes into account the morphology of willows within the *Salix* L. genus and is based on data published in different regions and countries. The object of our research is data on the volume of willow stems, which is published and freely available in Russia, Kazakhstan, Bulgaria, and Norway in the form of tables or regression models. However, the extent to which each local model is applicable in other regions is unknown. To resolve this uncertainty, we used meta-analysis as a statistical procedure that combines the results of several independent studies in order to find a common pattern. As a result, we obtained a generic model of stem volume for the *Salix* genus, which is characterized by a high coefficient of determination and can be applied to estimate the stem volume of any species of this genus with minimum deviations from the calculated values. The results of the work are aimed at improving the accuracy of accounting deciduous stands during forest management and monitoring activities, valuation of stands on permanent and temporary trial plots. The implementation of unified standards for the use, reproduction, conservation and protection of willow stands with all the diversity of its species will solve a number of practical issues.

For citation: Usoltsev V.A., Paramonov A.A., Tretyakov S.V., Koptev S.V., Tsepordey I.S. Generic Model of Willow Stem Volume: A Meta-Analysis. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 49–58. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-49-58

Keywords: Salix L. genus, stem volume, generic model, meta-analysis, regression analysis.

Поступила 26.02.20 / Received on February 26, 2020

УДК 582.475.2:581.522.4
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-59-72

РОСТ ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНОВ *Picea abies* (L.) Karst. В АНТРОПОГЕННОЙ СРЕДЕ

И.Т. Кищенко[1], д-р биол. наук, проф., акад. РАЕ; *ResearcherID: AAC-1083-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1039-1020*
Е.С. Ольхина[2], канд. биол. наук, ст. преп.; *ResearcherID: AAG-1839-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3476-2946*
[1]Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910; e-mail: ivanki@karelia.ru
[2]Петрозаводский лесотехнический техникум, ул. Калинина, д. 41, г. Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185003; e-mail: olkhin@psu.karelia.ru

Аннотация. Исследования проводили в девостоях в различных по степени нарушенности условиях: в городе, пригородных лесах и лесах зеленой зоны. Рекреационные нагрузки сильнейшим образом отражаются на санитарном состоянии ельников. Число здоровых деревьев с усилением рекреационной дигрессии сокращается до 30–42 %, а число усыхающих и сухостойных увеличивается до 15–36 %. Состояние древостоев в лесах зеленой зоны оценивается 1,2–1,5 балла, а в пригородных лесах – 2,1–2,7. Усыхающих и сухостойных деревьев в лесах зеленой зоны не обнаружено, а в пригородных их доля составила соответственно 15 и 36 % от общего числа. Поэтому в целом ельники пригородных лесов относятся к категории ослабленных. Около 59 % их площади находится в III стадии рекреационной дигрессии, а 19 % – в IV стадии. Исследования показали, что особенности ростовых процессов *P. abies* определяются в основном сезонной изменчивостью метеорологических факторов. Установлено, что ранее всего рост побегов и хвои начинается и заканчивается в условиях города. Погодичная изменчивость в сроках прохождения этих фенофаз составляла 1-2 недели. Уплотнение почвы в результате рекреационных нагрузок особенно негативным образом сказывается на интенсивности роста деревьев и годичном приросте вегетативных органов. Побеги *P. abies* в лесах зеленой зоны (ненарушенные древостои) длиннее, чем в пригородных и городских насаждениях соответственно на 2–30 и 6–17 %. В лесах зеленой зоны формируется и самая длинная хвоя (16,6–19,7 мм). Значение этого показателя в городских насаждениях составляет всего 12,8–15,0 мм. Наименьшая охвоенность побегов отмечена в условиях города, характеризующихся максимальной степенью рекреационной дегрессии. Здесь годичный радиальный прирост ствола *P. abies* по сравнению с лесами зеленой зоны снижается на 16–20 %. Последовательность в ростовых фенофазах не зависит от степени нарушенности окружающей среды. Первыми (в мае) идут в рост побеги, через 1-2 недели – молодая хвоя, затем начинается формирование древесины в нижней части ствола. Последовательность в прекращении ростовых процессов следующая: побеги, хвоя, стволы.

Для цитирования: Кищенко И.Т., Ольхина Е.С. Рост вегетативных органов *Picea abies* (L.) Karst. в антропогенной среде // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 59–72. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-59-72
Финансирование: Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект 18-44-100002 р_а).

Ключевые слова: рекреация, *Picea abies*, рост, побеги, хвоя, ствол, антропогенные факторы.

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

Введение

Изучению сезонного роста и развития растений, в том числе древесных видов, уделяется большое внимание как в России, так и за рубежом. При этом объектами исследований служат аборигенные и интродуцированные древесные растения и в частности хвойные. Санитарное состояние наиболее полно характеризует рост и развитие лесообразующих видов [2, 5, 19, 22]. Поэтому изучение эколого-биологических особенностей роста имеет чрезвычайно важное теоретическое и практическое значение.

Урбанизация, идущая нарастающими темпами, приводит к вовлечению в сферу рекреационного применения огромных территорий различных типов растительности и в первую очередь лесов. Вокруг г. Петрозаводска для этого используются леса, представленные преимущественно еловыми древостоями. Их общее состояние под влиянием высоких рекреационных нагрузок значительно ухудшается, а защитные и санитарно-гигиенические функции снижаются [1, 2, 17, 20–22]. Объективная оценка использования ельников в рекреационных целях возможна лишь на основе всесторонних исследований. В первую очередь это относится к выявлению изменений в ростовых процессах деревьев *P. abies* при различной степени нарушенности, что позволит достоверно определять и прогнозировать устойчивость лесов под влиянием рекреации.

Вопросы роста хвойных видов деревьев в урбанизированной среде разработаны пока довольно слабо. Особенности реакций меристем *P. abies* на экологические факторы в условиях разной степени нарушенности носят противоречивый характер. В Карелии подобные исследования ранее не проводились.

Цель работы – изучение влияния экологических факторов на сезонный рост *P. abies* в древостоях различной степени нарушенности в южной Карелии.

Объекты и методы исследования

Сезонный рост вегетативных органов *P. abies* изучали в южной Карелии в 2001–2005 гг. в условиях различной степени нарушенности: в городе (урбанизированная среда), пригородных лесах (примыкающие к границам города), лесах зеленой зоны (ненарушенные древостои, расположенные в 5 км южнее г. Петрозаводска). Преобладающее направление ветра в районе исследований – с юго-запада на северо-восток, в связи с чем леса зеленой зоны не подвержены вредному влиянию городских поллютантов. Объектами исследований в пригородных лесах и лесах зеленой зоны служили чистые по составу приспевающие (70–90 лет) древостои кисличного, черничного, приручейного и травяного ельников.

Сезонный рост побегов изучали по методикам [4], [9] и [15]. Длину стеблей (далее побегов) второго порядка ветвления измеряли с юго-западной части кроны на высоте около 2 м. Наблюдения проводили через каждые 3 сут. с момента набухания вегетативных почек до заложения зимующих вегетативных почек. Длину хвои измеряли у основания этих же стеблей с момента распускания вегетативных почек до полного прекращения их роста через каждые 3 сут.

Формирование древесины ствола изучали по методике [9]. У каждого учетного дерева после начала деятельности камбия отбирали образцы древесины через каждые 5 сут. по воображаемой спирали – слева направо и снизу вверх.

Для просмотра препаратов древесины использовали микротом GRANUM-202 [16]. Ширину растущего слоя древесины измеряли в 3 местах с точностью до 1 мкм, при помощи микроскопа МБМ с микрометром МОВ (от камбиальной зоны до зоны поздней древесины прошлого года).

Данные о температуре воздуха предоставлены Петрозаводской гидрометобсерваторией (Сулажгорская метеостанция). Объем выборки для каждого срока наблюдений (по каждому виду) составил по 20 побегов, хвоинок и тканей ствола. Суточный прирост определяли как разницу в величинах показателя между последующим и предшествующим наблюдениями, отнесенную к числу суток этого периода.

Санитарное состояние деревьев устанавливали по методике [8]. Маршрутное обследование осуществляли по ходовым линиям. На каждой пробной площади в перечет включали 100 деревьев. Для каждого из них выявляли категорию состояния по санитарным правилам [11].

По результатам наблюдений за ростом вегетативных органов был сформирован банк данных, обработанный с помощью рекомендуемых для этих целей методов [3]. Выявлено, что при определении среднеарифметической величины прироста побегов показатель точности опыта составляет 4–5 %, а коэффициент вариации – 20 %; для хвои – 1–2 и 10–13 %, для ствола – 5–6 и 33 % соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение

Санитарное состояние древостоев. Работы ученых [7, 12, 13] свидетельствуют о негативном влиянии рекреации на рост и состояние растительности, в т. ч. и лесной. Наиболее объективным интегральным показателем состояния деревьев является интенсивность их роста, а именно – прирост за вегетационный период (годичный прирост).

Проведенные исследования выявили довольно высокие санитарно-гигиенические свойства всех изученных древостоев. Высший балл по этому критерию установлен для древостоев на 38,7 % площади обследованной территории, а средний балл – на 55,6 % площади (табл. 1).

Все древостои оценены по категориям состояния. Если средневзвешенный балл состояния составлял 1–1,5, то древостой относили к категории «условно здоровый», если 1,6–2,5 – к категории «ослабленный», если более 2,5 – «сильно ослабленный». Категория состояния древостоев в лесах зеленой зоны оценивается 1,2–1,5 балла, а в пригородных – 2,1–2,7 балла. Усыхающих и сухостойных деревьев в зеленой зоне не обнаружено, а в пригороде их доля составила 15…36 % от общего числа. В целом ельники пригородных лесов относятся к категории ослабленных, а ельник приручейный – к категории сильно ослабленных.

Изменения, происходящие в лесных сообществах под влиянием рекреации, принято характеризовать стадиями рекреационной дигрессии. Древостои пригородных лесов в той или иной степени подвержены такой дигрессии. При этом около 59 % площади составили участки с изменениями среды средней степени (III стадия рекреационной дигрессии), а 19 % – с изменениями сильной степени (IV стадия рекреационной дигрессии).

Таблица 1

Характеристика состояния древостоев в пригородных лесах и лесах зеленой зоны

Тип условий произрастания ельника	Распределение деревьев, %, в зависимости от балла по категории состояния						Средневзвешенный балл состояния
	1	2	3	4	5	6	
Леса зеленой зоны							
Кисличный	83	13	4	0	0	0	1,2
Черничный	79	12	7	2	0	0	1,3
Приручейный	70	4	24	0	2	0	1,6
Травяный	75	17	7	1	0	0	1,3
Пригородные леса							
Кисличный	30	12	39	16	3	0	2,5
Черничный	34	19	30	15	2	0	2,3
Приручейный	29	15	20	31	5	0	2,7
Травяный	42	27	16	14	1	0	2,1

Примечание: Учитывались деревья с диаметром на высоте 1,3 м более 8 см.

Наиболее негативно рекреация сказалась на древостоях приручейного и кисличного ельников (IV стадии рекреационной дигрессии). В первом средневзвешенный балл состояния составил 2,7, а во втором – 2,5 (табл. 1). В ельнике приручейном доля здоровых деревьев – 29 %, а в кисличном – 30 %. Доля усыхающих деревьев и сухостоя достигла здесь соответственно 36 и 19 %.

Черничный и травяный ельники характеризуются III стадией рекреационной дигрессии (средневзвешенные баллы состояния – 2,3 и 2,1 соответственно); доля здоровых деревьев – 34 и 42 % соответственно, усыхающих и сухостойных деревьев – 17 и 15 %.

В зеленой зоне неблагоприятных изменений лесной среды не выявлено (I стадия рекреационной дигрессии). Доля здоровых деревьев составила 70…83 %. При этом средневзвешенный балл состояния 1,2…1,5, что соответствует категории «условно здоровый». Данные табл. 1 показывают, что с увеличением рекреационной дигрессии уменьшается количество здоровых деревьев и увеличивается число усыхающих и сухих. Результаты корреляционного анализа (r = –0,98) подтверждают установленную зависимость.

Сезонный рост вегетативных органов

Рост побегов в длину. Исследования доказали, что сроки начала роста побегов *P. abies* связаны с повышением среднесуточной температуры воздуха до +10,7…+13,9 °С (табл. 2, 3). Погодичная вариация дат начала этой фенофазы может достигать 2–15 сут. Раньше всего рост побегов начинается у деревьев в условиях города (6–7.V), а затем в пригородных лесах (13–16.V).

Наступление кульминации прироста побегов отмечалось с 13 по 28.VI и достигало суточного максимума в пригородных лесах в кисличном и травяном ельниках – 2,2–3,1 мм (табл. 4). Корреляционный анализ позволил выявить (r = +0,41…+0,67) существенное влияние температуры воздуха на интенсивность этого процесса только в докульминационный период, что подтверждается и выводами других ученых [6, 10].

Таблица 2

Температурный режим воздуха в период роста деревьев *Picea abies* в городе (по данным за 2004 г.)

Объект исследования	Начало роста			Кульминация прироста			Окончание роста		
	Дата	Среднесуточная температура воздуха, °С	Сумма положительных температур, °С	Дата	Среднесуточная температура воздуха, °С	Сумма положительных температур, °С	Дата	Среднесуточная температура воздуха, °С	Сумма положительных температур, °С
Побеги									
Центр города	7.V	13,3	95	13–15.VI	13,4	444	9.VII	17,5	814
Окраина города	6.V	10,7	82	12–14.VI	13,3	418	14.VII	16,2	900
Хвоя									
Центр города	22.V	8,4	195	23–25.V	9,7	224	6.VII	15,4	766
Окраина города	21.V	9,8	205	28–30.V	13,7	378	8.VII	16,4	797

Таблица 3

Температурный режим воздуха в период роста деревьев *Picea abies* в пригородных лесах (ельник черничный)

Орган дерева	Год наблюдений	Начало роста			Кульминация прироста			Окончание роста		
		Дата	Среднесуточная температура воздуха, °С	Сумма положительных температур, °С	Дата	Среднесуточная температура воздуха, °С	Сумма положительных температур, °С	Дата	Среднесуточная температура воздуха, °С	Сумма положительных температур, °С
Побеги	2003	13.V	11,7	137	17–28.VI	10,9	574	26.VII	21,0	1146
	2004	15.V	12,5	139	14–21.VI	19,5	464	17.VII	17,3	950
	2005	16.V	13,9	109	13–19.VI	19,2	538	19.VII	11,2	1128
Хвоя	2003	20.V	9,5	217	8–14.VI	10,5	454	1.VII	15,8	673
	2004	2.VI	11,9	319	11–17.VI	23,5	444	14.VII	16,2	900
	2005	18.V	11,0	135	24–30.V	15,1	275	30.VI	15,1	752
Ствол	2003	10.VI	11,3	449	10–20.VII	19,0	930	27.VIII	10,0	1690
	2004	10.VI	12,1	382	30.VI–10.VII	18,6	751	21.VIII	16,7	1525
	2005	3.VI	10,0	327	23.VI–3.VII	17,1	743	13.VIII	16,6	1567

За годы наблюдений сроки прекращения роста побегов изменялись в пределах 1-2 недель. Рост побегов заканчивался почти одновременно во всех изучаемых условиях произрастания.

Исследования показали, что с уменьшением степени нарушенности среды обитания годичный прирост побегов увеличивается. Так, значение этого показателя в лесах зеленой зоны больше, чем в городских и пригородных древостоях, в среднем соответственно на 12 и 16 % (табл. 4, 5).

Продолжительность роста побегов *P. abies* в разных типах сообществ различалась несущественно, варьируя по годам от 58 до 78 сут. Ряд ученых [13, 14, 18, 19] полагает, что даже при незначительной рекреационной дигрессии, а также вблизи источников выбросов поллютантов, морфометрические показатели, в т. ч. и размер побегов, существенно уменьшаются.

Рост хвои в длину. Рост хвои *P. abies* начинается через 1–3 недели после того, как идут в рост побеги (табл. 2, 3). Данные сроки варьируют по годам (18.V–2.VI), но с условиями произрастания не связаны. Температура в этот время повышается до +8,4…+11,9 °С.

Раньше всего кульминация прироста хвои наблюдалась в условиях урбанизированной среды (23–30.V), а в пригородных лесах намного позднее – 11–17.VI. Максимальный прирост хвои за годы исследований достигал 0,5–0,8 мм/сут (табл. 4). Наиболее заметна зависимость между интенсивностью этого процесса и температурой воздуха в докульминационный период (r = +0,43…+0,92). Такая закономерность прослеживается на протяжении всего периода роста (r = +0,35…+0,41). К подобным выводам пришли и другие исследователи [6, 10].

Рост хвои раньше всего заканчивался в условиях города – 6–8.VII, а в пригородных лесах – только 14.VII.

Наиболее длительный период формирования хвои *P. abies* установлен в урбанизированной среде (45–47 сут.). В пригородных лесах он составил всего 42 дня.

Самая длинная хвоя (16,6–19,7 мм) формируется в ненарушенных условиях – в лесах зеленой зоны. В насаждениях города величина этого показателя значительно меньше – всего 12,8–15,0 мм (табл. 5). Отрицательное влияние условий урбанизированной среды на морфологические характеристики ассимиляционного аппарата отмечают и другие ученые [1, 24].

Радиальный рост стволов. Первые признаки формирования камбием древесины ствола (на высоте 1,3 м) наблюдались через 1–3 недели после начала роста хвои (табл. 3) при среднесуточной температуре +10…+11,1 °С одновременно на всех объектах исследования. Максимальная интенсивность прироста древесины (26–36 мкм за сутки) отмечалась при потеплении до +17,1…+19,0 °С (табл. 4). Результаты исследований, проведенных ранее, также свидетельствуют об усилении деятельности камбия ствола в связи с повышением температуры воздуха [6, 10, 20, 23].

Сроки прекращения формирования древесины ствола за годы исследований варьировали в значительных пределах (13–27.VIII). Продолжительность роста древесины составила 72–79 сут. (табл. 4).

Таблица 4

Характеристики прироста побегов, хвои и стволов у деревьев *Picea abies* в разных типах сообществ пригородных лесов

Характеристики прироста	Ельник черничный			Ельник кисличный			Ельник приручейный			Ельник травяный		
	2003	2004	2005	2003	2004	2005	2003	2004	2005	2003	2004	2005
Побеги												
Максимальный суточный прирост, мм	1,9± ±0,08	2,8± ±0,12	3,1± ±0,13	2,2± ±0,09	2,4± ±0,10	3,1± ±0,13	2,3± ±0,09	1,5± ±0,06	1,8± ±0,07	2,4± ±0,10	2,3± ±0,09	3,1± ±0,13
Годичный прирост, мм	64,2±3	71,0±3	70,5±3	59,1±2	68,9±3	62,4±3	51,1±2	48,1±2	46,8±2	59,6±2	73,5±3	69,6±3
Продолжительность роста, сут	75	64	63	75	61	68	78	58	62	77	58	59
Хвоя												
Максимальный суточный прирост, мм	0,8± ±0,01	0,7± ±0,01	0,6± ±0,01	0,8± ±0,01	0,8± ±0,01	0,7± ±0,01	0,7± ±0,01	0,6± ±0,01	0,5± ±0,01	0,7± ±0,01	0,7± ±0,01	0,7± ±0,01
Годичный прирост, мм	15,0± ±0,20	12,8± ±0,17	13,0± ±0,17	13,6± ±0,18	13,6± ±0,18	14,2± ±0,18	15,6± ±0,21	11,3± ±0,15	11,2± ±0,15	14,2± ±0,18	13,4± ±0,17	12,6± ±0,17
Продолжительность роста, сут	43	43	44	43	40	37	42	34	37	41	43	40
Стволы												
Максимальный суточный прирост, мкм	27± ±3,0	27± ±3,0	26± ±2,9	36± ±4,0	37± ±4,1	29± ±3,2	32± ±3,5	29± ±3,2	29± ±3,2	33± ±3,7	36± ±4,0	30± ±3,3
Годичный прирост, мм	2,15± ±0,24	2,26± ±0,25	2,06± ±0,23	2,30± ±0,26	2,43± ±0,27	2,19± ±0,24	1,73± ±0,19	1,88± ±0,21	1,69± ±0,19	1,92± ±0,21	2,10± ±0,23	1,79± ±0,20
Продолжительность роста, сут	79	73	72	79	73	72	72	73	72	75	73	72

Таблица 5

Годичный прирост побегов и хвои *Picea abies* в древостоях разной степени нарушенности

Объект исследования	Показатель	Год наблюдений					M±m	σ
		2000	2001	2002	2003	2004		
Городские насаждения	Длина побега, мм	67± ±2,8	58± ±2,4	53± ±2,2	71± ±2,9	71± ±2,9	64,0± ±14,3	32,0
	Длина хвои, мм	15± ±0,20	15± ±0,20	14± ±0,19	13± ±0,18	13± ±0,18	14,0± ±3,10	7,0
	Число хвои на побеге, шт.	21± ±0,87	28± ±1,16	30± ±1,25	43± ±1,80	55± ±2,30	35,4± ±7,90	17,7
Пригородные леса	Длина побега, мм	63± ±2,7	61± ±2,5	62± ±2,6	61± ±2,5	62± ±2,6	62,0± ±13,8	31,0
	Длина хвои, мм	15± ±0,20	15± ±0,20	15± ±0,20	15± ±0,20	16± ±0,30	15,2± ±3,35	7,5
	Число хвои на побеге, шт.	21± ±0,87	31± ±1,29	42± ±1,75	55± ±2,29	68± ±2,80	43,4± ±9,70	21,7
Леса зеленой зоны	Длина побега, мм	67± ±2,80	78± ±3,25	72± ±3,00	66± ±2,70	68± ±2,80	70,2± ±15,70	35,1
	Длина хвои, мм	17± ±0,23	18± ±0,24	17± ±0,23	17± ±0,23	16± ±0,22	17,0± ±3,80	8,5
	Число хвои на побеге, шт.	41± ±1,70	48± ±2,00	61± ±2,50	61± ±2,50	66± 2,75	55,4± ±12,30	27,7

Примечание: M±m – среднее значение и ошибка среднего арифметического; σ – среднеквадратическое отклонение. Результаты достоверны с вероятностью 0,95.

Годичный прирост вегетативных органов

Прирост побегов в длину. Исследования показали, что годичный прирост побегов *P. abies* в пригородных лесах, подверженных рекреационной дигрессии, существенно снижается по сравнению с приростом в ельниках зеленой зоны, не подверженных таковой. Так, в ельнике кисличном этот показатель у древостоев на IV стадии рекреационной дигрессии в среднем меньше на 18 %, чем у древостоев зеленой зоны I стадии (табл. 6). Подобные различия у ельника приручейного достигают 26 %, у черничного – 4 %, у травяного – 9 %.

В пригородных лесах приручейные ельники наиболее интенсивно посещаются населением, поэтому доля вытоптанного напочвенного покрова в них наибольшая – 16 %. Величина данного показателя в древостоях черничного и травяного типов значительно меньше – 6 и 8 % соответственно. Ельники зеленой зоны находятся на I стадии рекреационной дигрессии, и площадь уплотненной поверхности почвы составляет всего 0,4–0,9 %. Обнаруженная прямая зависимость между рекреационной дигрессией и площадью уничтоженного напочвенного покрова подтверждается результатами корреляционного анализа (r = +0,92).

Таблица 6

Годичный прирост (мм) побегов, хвои и стволов *Picea abies* в сообществах разных типов различной степени нарушенности

Год наблюдений	Ельник черничный		Ельник кисличный		Ельник травяный		Ельник приручейный	
	Зеленая зона (I)	Пригородные леса (III)	Зеленая зона (I)	Пригородные леса (IV)	Зеленая зона (I)	Пригородные леса (III)	Зеленая зона (I)	Пригородные леса (IV)
Побеги								
2003	65,4±2,7	64,2±2,7	60,2±2,5	59,1±2,5	64,0±2,7	59,6±2,5	60,4±2,5	51,1±2,1
2004	72,8±3,0	71,0±3,0	86,2±3,6	68,9±2,9	80,1±3,3	73,5±3,1	70,4±2,9	48,1±2,0
2005	75,3±3,1	70,5±2,9	84,6±3,5	62,4±2,6	77,9±3,2	69,6±2,9	65,6±2,7	46,8±1,9
Хвоя								
2003	19,7±0,26	15,0±0,20	60,2±2,50	13,6±0,18	18,3±0,24	14,2±0,18	16,5±0,22	15,6±0,21
2004	17,1±0,23	12,8±0,17	86,2±3,60	13,6±0,18	17,6±0,23	13,4±0,17	14,8±0,20	11,3±0,15
2005	16,6±0,22	13,0±0,17	84,6±3,50	14,2±0,18	15,9±0,21	12,6±0,17	15,9±0,21	11,2±0,15
Ствол								
2003	2,58±0,29	2,15±0,24	2,76±0,31	2,30±0,26	2,51±0,28	1,92±0,21	2,88±0,32	1,73±0,19
2004	2,67±0,30	2,26±0,25	2,85±0,32	2,43±0,27	2,59±0,29	2,10±0,23	2,95±0,33	1,88±0,21
2005	2,39±0,27	2,06±0,23	2,52±0,28	2,19±0,24	2,35±0,26	1,79±0,20	2,76±0,28	1,69±0,19

Примечание: M – среднее арифметическое значение; ±m – ошибка среднего арифметического; I, III, IV – стадии рекреационной дигрессии.

Обнаружено, что с увеличением поверхности уплотненной почвы годичный прирост побегов закономерно снижается в разных типах сообществ. Так, в пригородных лесах в результате возрастания доли утоптанной поверхности почвы на 6…24 % годичный прирост побегов меньше на 4–26 % по сравнению с приростом в зеленой зоне. В последней доля уплотненной поверхности почвы составляла всего 0,5–0,9 %. Таким образом, годичный прирост побегов с уплотнением поверхности почвы связан обратно пропорциональной зависимостью (r = –0,89).

Прирост хвои в длину. В ходе исследований доказано, что с усилением рекреационной дигрессии годичный прирост хвои *P. abies* снижается (табл. 6). В пригородных лесах (III и IV стадии рекреационной дигрессии) величина этого показателя в среднем на 17…24 % меньше, чем в тех же типах лесных сообществ зеленой зоны.

Установлена следующая закономерность: с увеличением площади вытоптанной поверхности годичный прирост хвои *P. abies* уменьшается. Интенсивность рекреационного воздействия по-разному отражается на снижении данного показателя в разных типах лесных сообществ. Например, годичный прирост хвои в пригородных лесах по сравнению с лесами зеленой зоны уменьшился в ельнике травяном на 22 %, в приручейном – на 19 %, в кисличном – на 17 %.

Наименьшая охвоенность побегов отмечена в условиях города, характеризующихся максимальной степенью рекреационной дегрессии (см. табл. 5). Здесь величина годичного прироста хвои по сравнению с лесами зеленой зоны снижается на 16…20 %.

Радиальный прирост ствола. Как показали исследования, в ельниках зеленой зоны формируется гораздо более широкое годичное кольцо, чем в пригородных лесах, находящихся на III и IV стадиях рекреационной дигрессии (табл. 6). При этом различия данного показателя зависят от типа лесного сообщества, достигая 15…38 %. Результаты корреляционного анализа свидетельствуют об отрицательной зависимости между годичным радиальным приростом ствола и усилением степени рекреационной дегрессии (r = –0,83).

Обнаружено, что в древостоях всех изученных типов сообществ годичный радиальный прирост уменьшается с увеличением площади вытоптанного напочвенного покрова, а значит и с уплотнением поверхности почвы. Так, в ельниках пригородных лесов величина этого показателя по сравнению с древостоями соответствующих типов сообществ зеленой зоны снизилась на 15…38 %. Вполне закономерно, что в древостоях пригорода выявлена и максимальная доля вытоптанного напочвенного покрова – 24 %. Результаты корреляционного анализа подтверждают найденную закономерность (r = –0,77).

Выводы

1. Рекреационные нагрузки оказывают сильнейшее влияние на санитарное состояние ельников. С усилением рекреационной дигрессии число здоровых деревьев сокращается примерно на треть, а число усыхающих и сухостойных увеличивается на соответствующую величину. Леса зеленой зоны относятся к условно здоровым (по состоянию 1,2–1,5 балла), а пригородные леса − к категории ослабленных (2,1–2,7 балла). В лесах зеленой зоны усыхающих и сухостойных деревьев нет, а в пригородных лесах их доля достигает 36 % от общего числа. Площадь пригородных лесов в III стадии рекреационной дигрессии составляет 59 %, а в IV стадии − 19 %.

2. Рост побегов *P. abies* в черте города начинается на 2 недели раньше, чем в пригородных лесах. Кульминация прироста в городе отмечалась с 13 по 28.VI, запаздывая в пригородных лесах на 1–5 дней. Суточный прирост побегов в пригородных древостоях достигал максимума в кисличном и травяном ельниках – 2,2…3,1 мм. Процесс заканчивался почти одновременно во всех исследуемых условиях. Его продолжительность в разных типах сообществ отличалась незначительно, варьируя по годам от 58 до 78 сут. Годичный прирост побегов в лесах зеленой зоны больше, чем в городских и пригородных, в среднем соответственно на 16 и 12 %.

3. Сроки начала роста хвои *P. abies* варьируют по годам (18.V–2.VI) и с условиями произрастания не связаны. Раньше всего кульминация этого процесса наблюдалась в условиях урбанизированной среды (23–30.V). Максимальный прирост хвои за годы исследований достигал 0,5–0,8 мм/сут. рост хвои заканчивался сначала в условиях города – 6–8.VII, а потом в пригородных лесах – 14.VII. Наиболее длительный период формирования хвои установлен в урбанизированной среде (45–47 сут.). Самая длинная хвоя (16,6–19,7 мм) формируется в лесах зеленой зоны, а в насаждениях города величина этого показателя составляет всего 12,8–15,0 мм.

4. Начало формирования камбием древесины ствола отмечается одновременно на всех объектах исследования. Максимальный суточный прирост составлял 26–36 мкм. Сроки прекращения формирования древесины ствола за годы исследований варьировали в значительных пределах (13–27.VIII). Продолжительность ее роста была 72–79 сут.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Барайщук Г.В., Гайвас А.А.* Состояние хвойных насаждений Омска // Лесн. хоз-во. 2005. № 1. С. 33–34.

Barayshchuk G.V., Gayvas A.A. The State of Coniferous Plantations of Omsk. *Lesnoe khozyaystvo*, 2005, no. 1, pp. 33–34.

2. *Бухарина И.Л., Поварницина Т.М., Ведерников К.Е.* Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде: моногр. Ижевск: Ижевская ГСХА. 2007. 216 с.

Bukharina I.L., Povarnitsina T.M., Vedernikov K.E. *Ecological and Biological Features of Woody Plants in an Urbanized Environment*. Izhevsk, IzhGSHA Publ., 2007. 216 p.

3. *Зайцев Г.Н.* Математическая статистика в экспериментальной ботанике. М.: Наука, 1984. 424 с.

Zaytsev G.N. *Mathematical Statistics in Experimental Botany*. Moscow, Nauka Publ., 1984. 424 p.

4. *Елагин И.Н.* Методика проведения и обработки фенологических наблюдений за деревьями и кустарниками в лесу // Фенологические методы изучения лесных биогеоценозов / отв. ред. И.Н. Елагин, Т.Н. Буторина. Красноярск: Ин-т леса и древесины СО АН СССР, 1975. С. 3–20.

Elagin I.N. Methodology for Conducting and Processing Phenological Observations of Trees and Shrubs in the Forest. *Phenological Methods for the Study of Forest Biogeocenoses*. Ed. by I.N. Elagin, T.N. Butorina. Krasnoyarsk, Institut lesa i drevesiny SO AN SSSR Publ., 1975, pp. 3–20.

5. *Кищенко И.Т.* Рост и развитие аборигенных и интродуцированных видов семейства *Pinceae* Lindl. в условиях Карелии. Петрозаводск: ПетрГУ, 2000. 211 с.

Kishchenko I.T. *Growth and Development of Aboriginal and Introduced Species of the Pinaceae* Lindl. *Family in Karelia*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2000. 211 p.

6. *Кищенко И.Т., Вантенкова И.В.* Влияние экологических факторов на сезонный рост *Picea abies* L. (Karst.) в Северной Карелии // Экология. 2007. № 2. С. 111–116.

Kischenko I.T., Vantenkova I.V. Effects of Environmental Factors on the Seasonal Growth of *Picea abies* L. (Karst.) in Northern Karelia. *Ekologia* [Russian Journal of Ecology], 2007, no. 2, pp. 111–116. DOI: https://doi.org/10.1134/S1067413607020063

7. *Лямеборшай С.Х., Пугаев А.С.* Методика и программа определения экологического ущерба в лесу // Лесн. хоз-во. 2005. № 4. С. 29–32.

Lyameborshay S.Kh., Pugayev A.S. Methodology and Program for Determining Environmental Damage in the Forest. *Lesnoye khozyaystvo*, 2005, no. 4, pp. 29–32.

8. *Мозолевская Е.Г., Белова Н.К., Куликова Е.Г., Соколова Э.С., Липаткин В.А., Шарапа Т.В., Сураппаева В.М., Щербаков А.Н., Белов Д.А., Мазитов С.В.* Итоги мониторинга состояния зеленых насаждений и городских лесов Москвы в 1997 году // Лесн. вестн. 1998. № 2. С. 14–28.

Mozolevskaya E.G., Belova N.K., Kulikova E.G., Sokolova E.S., Lipatkin V.A., Sharapa T.V., Surappayeva V.M., Shcherbakov A.N., Belov D.A., Mazitov S.V. The Results of Monitoring the State of Greenery and Urban Forests in Moscow in 1997. *Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 1998, no. 2, pp. 14–28.

9. *Молчанов А.А., Смирнов В.В.* Методика изучения прироста древесных растений. М.: Наука, 1967. 95 с.

Molchanov A.A., Smirnov V.V. *Methods of Studying the Growth of Woody Plants.* Moscow, Nauka Publ., 1967. 95 p.

10. *Робакидзе Е.А., Патов А.И.* Рост хвои ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в зависимости от экологических факторов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2011. № 3. С. 7−14.

Robakidze E.A., Patov A.I. Needles Growth of Siberian Spruce Depending on Environmental Factors. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2011, no. 3, pp. 7−14. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/fa7/nwiq1.pdf

11. Правила санитарной безопасности в лесах [Текст]: утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2017 г. № 607. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_217315/0b3dfd4779a800d94c98bb0d44cd53e-1dae94450/ (дата обращения: 27.04.21).

Sanitary Safety Rules in Forests: Approved by Decree of the Government of the Russian Federation of May 20, 2017 No. 607.

12. *Синькевич С.М.* Динамика древесного прироста в зонах техногенных эмиссий // Биоэкологические аспекты мониторинга лесных экосистем Северо-Запада России: сб. науч. тр. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 130–143.

Sin'kevich S.M. Dynamics of Tree Growth in the Areas of Technogenic Emissions. *Bioecological Aspects of Monitoring Forest Ecosystems of the North-West of Russia: Collection of Academic Papers*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2001, pp. 130–143.

13. *Таран И.В., Спиридонов В.Н., Беликова Н.Д.* Леса города. Новосибирск: СО РАН, 2004. 196 с.

Taran I.V., Spiridonov V.N., Belikova N.D. *The Forests of the City*. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2004. 196 p.

14. *Черненькова Т.В.* Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука. 2002. 191 с.

Chernen'kova T.V. *Reaction of Forest Vegetation to Industrial Pollution*. Moscow, Nauka Publ., 2002. 191 p.

15. *Шульц Г.Э.* Общая фенология. Л.: Наука, 1981. 188 с.

Shul'ts G.E. *General Phenology*. Leningrad, Nauka Publ., 1981. 188 p.

16. *Яценко-Хмелевский А.А.* Основы и методы анатомического исследования древесины. М.; Л.: Акад. наук СССР, 1954. 338 с.

Yatsenko-Khmelevskiy A.A. *Fundamentals and Methods of Anatomical Studies of Wood*. Moscow, Nauka Publ., 1954. 338 p.

17. Driesen D.M. The Societal Cost of Environment Regulation: Beyond Administrative Cost-Benefit Analysis. *Ecology Law Quarterly*, 1997, vol. 24, iss. 3, pp. 545–617. DOI: https://doi.org/10.15779/Z38K54F

18. Gloriod G. Reflexions et souvenirs, a propos d une reforme douloureuse. *Bulletin trimestriel – Société forestière de Franche-Comté et des provinces de l'Est*, 2003, no. 7, pp. 595–605.

19. Jeanes T.G. Multiple Use in Man-Made Forest. *The Forestry Chronicle*, 1987, vol. 63, no. 2, pp. 108–111. DOI: https://doi.org/10.5558/tfc63108-2

20. Leikola M. The Influence of Factors on the Diameter Growth of Forest Trees: Auxanometric Study. *Acta Forestalia Fennica*, 1969, vol. 92, art. 7610. DOI: https://doi.org/10.14214/aff.7610

21. Lu X., Mo J., Dong S. Effects of Nitrogen Deposition on Forest Biodiversity: A Review. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, vol. 28, iss. 11, pp. 5532–5548. DOI: https://doi.org/10.1016/S1872-2032(09)60012-3

22. Malmivaara M., Löfström I., Vanha-Majamaa I. Anthropogenic Effects on Understorey Vegetation in Myrtillus Type Urban Forests in Southern Finland. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, no. 1, pp. 367–381. DOI: https://doi.org/10.14214/sf.568

23. Odin H. Studies of the Increment Rhythm of Scots Pine and Norway Spruce Plants. *Studia Forestalia Suecica*, 1972, no. 97. 32 p.

24. Trimbacher C., Weiss P. Needle Surface Characteristics and Element Contents of Norway Spruce in Relation to the Distance of Emissions Sources. *Environmental Pollution*, 1999, vol. 105, iss. 1, pp. 111–119. DOI: https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00180-8

GROWTH OF VEGETATIVE ORGANS OF *Picea abies* (L.) Karst. IN ANTHROPOGENIC ENVIRONMENT

***Ivan T. Kishchenko*[1]**, *Doctor of Biology, Prof., Academician of RANH; ResearcherID: AAC-1083-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1039-1020*
***Elena S. Olkhina*[2]**, *Candidate of Biology, Senior Lecturer; ResearcherID: AAG-1839-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3476-2946*
[1]Petrozavodsk State University, prosp. Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; e-mail: ivanki@karelia.ru
[2]Petrozavodsk Forestry Technical School, ul. Kalinina, 41, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185003, Russian Federation; e-mail: olkhin@psu.karelia.ru

Abstract. The studies were carried out in stands of various degree of devastation: in the city, suburban forests and forests of the green zone. Recreational loads strongly affect the sanitary condition of spruce forests. The number of healthy trees decreases to 30–42 % with increasing recreational digression, while the number of declining and dead trees increases to 15–36 %. The state of tree stands in the forests of the green zone is estimated at 1.2–1.5 points, and 2.1–2.7 points in the suburban forests. No declining and dead trees were found in the forests of the green zone, and in the suburban forests their share was 15 and 36 % of the total number, respectively. Therefore, generally, spruce suburban forests are classified as weakened. Approximately 59 % of the area of suburban forests is in the III stage of recreational digression, and 19 % – in the IV stage. Growth studies of *P. abies* showed that the features of these processes are determined mainly by the seasonal variability of climatic factors. Studies have shown that the features of growth processes of *P. abies* are determined mainly by seasonal variation of meteorological factors. It was found that the earliest growth of shoots

and needles begins and ends in the urban environment. The year-by-year variability in the timing of these phenophases reaches 1–2 weeks. Soil compaction as a result of recreational loads has a particularly negative effect on the intensity of tree growth and annual growth of vegetative organs. Shoots of *P. abies* in green forests (undisturbed stands) are longer than in suburban and urban plantations by 2–30 % and 6–17%, respectively. The longest needles (16.6–19.7 mm) are formed in the forests of the green zone. In urban plantations this value is 12.8–15.0 mm. The smallest needle packing was found in the city conditions, characterized by the maximum degree of recreational digression. Here, the annual radial increment of the trunk of *P. abies* under the influence of recreational loads decreases by 16–20 % compared to the forests of the green zone. The sequence in the growth phenophases does not depend on the degree of environmental disturbance. The shoots are the first to grow (in May), young needles after 1 or 2 weeks, and then the formation of wood in the lower part of the trunk begins. The sequence in stopping the growth processes is as follows: shoots, needles, trunks.
For citation: Kishchenko I.T., Olkhina E.S. Growth of Vegetative Organs of *Picea abies* (L.) Karst. in Anthropogenic Environment. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 59–72. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-59-72
Funding: The research was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 18-44-100002 p_a).

Keywords: recreation, *Picea abies*, growth, shoots, needles, trunks, anthropogenic factors.

Поступила 08.01.20 / Received on January 8, 2020

УДК 630*182.21
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85

СТУПЕНЧАТАЯ ИНТРОДУКЦИЯ ВИДОВ ДЕНДРОФЛОРЫ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНУЮ ЧАСТЬ РУССКОЙ РАВНИНЫ (ОБЗОР)

Н.А. Бабич*[1]*, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID: G-7384-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7463-2519*
Е.Б. Карбасникова*[2]*, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID: AAH-6250-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2850-9362*
М.М. Андронова*[3]*, д-р с.-х. наук, доц.; *ResearcherID: AAB-4480-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9654-8913*
О.С. Залывская*[1]*, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID: AAY-4901-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7520-6295*
Ю.В. Александрова*[1]*, аспирант; *ResearcherID: AAH-4016-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2802-1124*
Н.П. Гаевский*[1]*, канд. с.-х. наук, доц.
[1]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д.17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: forest@narfu.ru
[2]Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555; e-mail: helen15@yandex.ru
[3]Вологодский институт права и экономики ФСИН России, ул. Щетинина, д. 2 а, г. Вологда, Россия, 160026; e-mail: mary1969@yandex.ru

Аннотация. Интродукция хозяйственно-ценных и декоративных видов с давних времен является одним из основных методов повышения биологического разнообразия дендрофлоры. Цель исследований – развитие теории ступенчатой интродукции видов дендрофлоры в северном направлении. Методологической базой исследований послужили труды специалистов в области лесной интродукции, в том числе интродукторов-северян Ф.Б. Орлова, П.М. Малаховца, В.Н. Нилова, Н.А Демидовой, О.С. Залывской, Е.Б Карбасниковой, М.М. Андроновой и др. Статья большей частью имеет теоретический характер и описывает развитие интродукции древесных и кустарниковых видов в суровых условиях северо-восточной части Русской равнины. Анализ результатов научной и стихийной интродукции позволил сформулировать рабочую гипотезу о возможности реализации ступенчатой интродукции ценных видов дендрофлоры за счет формируемого в городах особого микроклимата с более высоким уровнем температурного режима по сравнению с периферией. Предполагается, что теплового ресурса «островов тепла» должно быть достаточно для успешной акклиматизации культиваров, продвижения их семенного потомства в загородные условия с последующей натурализацией. На основе многолетних исследований сформулированы тезисы, охватывающие основные аспекты развития ступенчатой интродукции: начало первой ступени акклиматизации; факторы, влияющие на величину интродукционной ступени; приоритетный материал для обработки основных принципов ступенчатой интродукции; лимитирующие факторы северной границы интродукционного ареала; соответствие условий «островов тепла» условиям северной части предыдущей интродукционной ступени. Практическое применение данных тезисов позволит увеличить эффективность акклиматизационных испытаний интродуцируемых видов растений. Для объективной оценки результатов экспериментов предложена таблица успешности акклиматизации и натурализации видов дендрофлоры с учетом разных этапов онтогенеза. Синтез выводов и рекоменда-

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

ций способствует проведению целенаправленных мероприятий по адаптации растений и формированию достоверных прогнозов их натурализации.
Для цитирования: Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андронова М.М., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П. Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в северо-восточную часть Русской равнины (обзор) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 73–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85

Ключевые слова: ступенчатая интродукция, акклиматизация растений, натурализация, рабочая гипотеза, дендрофлора, интродукционные испытания.

Научная общественность обеспокоена истощением биоразнообразия, в том числе и лесных экосистем [5, 8, 17, 25, 34, 44, 45, 47]. Сравнительно бедный породный состав таежных лесов северо-восточной части Русской равнины обуславливает актуальность этой проблемы. Введение в культуру интродуцированных видов является одним из путей повышения хозяйственной освоенности земельных ресурсов, улучшения комфортности северных городов и поселков, формирования и расширения базы витаминного и лекарственного сырья [48, 50–53, 55–59].

Эффективное решение проблемы интродукции древесных растений в северные условия – метод их ступенчатой поэтапной акклиматизации в городских условиях с последующим культивированием устойчивого полноценного потомства в пригородных лесах зеленых зон.

Идею ступенчатой акклиматизации впервые высказал немецкий естествоиспытатель, географ и путешественник Александр Гумбольдт (1769–1859), который предложил переносить растения из тропиков в Европу через промежуточный пункт на Канарских островах [6].

В 1963 году Совет ботанических садов СССР обсудил вопрос об организации ступенчатой акклиматизации растений. Суть данного метода, по В.П. Доброхвалову [7], заключается в прерывчато-постепенном (ступенчатом) переносе растений из сухих географических условий в другие путем семенного размножения на каждую ступень, так как растительный организм в стадии семенного размножения является наиболее пластичным, легче перестраивает свою природу в соответствии с новыми условиями.

Следует отметить, что на Европейском Севере (Архангельская и Вологодская области, Республика Коми) есть примеры удачной стихийной и ступенчатой интродукции. Возраст этих образцов составляет десятки лет. К таким объектам следует отнести аллейные посадки лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) на Соловках (64° 57′ – 65° 12′ с. ш. и 35° 30′ и 36° 17′ в. д.) (рис. 1). Средняя высота лиственниц в 50-летнем возрасте составляет 21 м, что соответствует I классу бонитета [38], а в 70-летнем – высота достигает уже 25 м [14].

Т.Л. Фокина [39] приводит такой факт: известный северный краевед К.П. Гемп, побывавшая на Соловках в 1905 г., сообщила, что три соловецких монаха в тот год ездили на Памир, где встречались с Панчаламой, и привезли в подарок настоятелю семена многих растений. В их числе были роза морщинистая (*Rosa rugosa* Thunb.), сирень венгерская (*Syringa josikaea* J. Jacq. ex Rchb.) и бадан толстолистный (*Bergenia crassifolia* (L.) Fritsch), ставшие самыми массовыми культурами того монастырского периода.

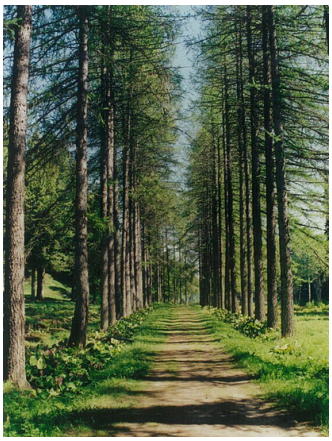


Рис. 1. Аллея *Larix sibirica* Ledeb в Соловецком ботаническом саду

Fig. 1. *Larix sibirica* Ledeb alley in the Botanical Garden of Solovetsky Museum-Preserve

В Вологодской области (современные границы) сохранились значимые памятники интродукции сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour): Катаевская роща (возраст старых кедров составляет около 200 лет [15]), Петеряевская роща (диаметр самого крупного дерева достигает 1,28 м) в Велико-Устюгском р-не и Чагринская роща (создание – 1900–1941 г.) в Грязовецком р-не, служащие базой заготовки лесосеменного сырья с последующим его использованием в лесокультурном деле. Такие интродукционные очаги являются своеобразными центрами распространения данной породы в северо-восточную часть Русской равнины.

Внимание ступенчатой акклиматизации плодовых растений при продвижении их в северном направлении уделял И.В. Мичурин, который не только обосновал возможность использования этого метода, но и практически доказал его реальность [21]. При продвижении культуры абрикоса в северные широты путем двукратного отбора наиболее устойчивых сеянцев, выращенных из косточек, глубина каждой ступени оказалась равной 300–350 км, а граница плодовой культуры передвинута на 700 км [20, 21]. Мичуринский принцип ступенчатой акклиматизации вполне применим и в области декоративного древоразведения и лесоводства.

Вопросом ступенчатой акклиматизации активно занимался А.Л. Лыпа [19–21]. В его работах отмечено, что среднюю величину географической ступени принимают в 300–400 км, а число ступеней определяют в 2–4 и более. В качестве акклиматизационных баз могут служить ботанические сады, лесные опытные станции и сеть государственных заповедников.

В результате многолетних исследований в дендрарии Архангельского лесотехнического института Ф.Б. Орлов, В.П. Тарабрин, П.М. Малаховец [34] пришли к выводу, что качественные показатели семян у дочерних поколений, как правило, выше, чем у материнских. У большинства пород второго поколения увеличилась масса 1000 шт. семян по сравнению с массой 1000 шт. семян интродуцированных материнских организмов: у сирени венгерской (*Syringa josikaea* J. Jacq. ex Rchb.) – на 27 %, у черемухи обыкновенной (*Prunus padus* L.) – на 26 %, у жимолости татарской (*Lonicera tatarica* L.) – на 15 %, у ирги обильноцветущей (*Amelanchier floridal* Lindl.) – на 95 %.

Трудами Ф.Б. Орлова [31, 32], В.Н. Нилова [26–31], П.М. Малаховца [22–24] созданы предпосылки научной платформы формирования оригинальной рабочей гипотезы о возможности продвижения в северные условия новых отселектированных хозяйственно-ценных лесных, плодово-ягодных и декоративных видов дендрофлоры.

На основе исследований О.С. Залывской [11], Е.Б. Соколовой [35], С.В. Хрущевой [43] и М.М. Андроновой [1] сформирована оригинальная рабочая гипотеза о возможности успешной ступенчатой интродукции видов дендрофлоры в бореальные условия таежной зоны Русской равнины за счет особого микроклимата «островов тепла» в городах, где отмечается более высокий уровень температурного режима, чем за их пределами. Этого теплового ресурса должно быть достаточно для успешной акклиматизации и натурализации культиваров с последующим продвижением их семенного потомства в загородные условия произрастания. Наибольшие температурные контрасты «г. Вологда – пригород» отмечаются зимой и могут достигать 10–14 °С. В летний период эти различия не превышают 4–5 °С [18].

Метод ступенчатой акклиматизации основан на приобретении за весь жизненный цикл новых свойств в непривычной для растения среде. Изменения, которые происходят на разных этапах развития в процессе приспособления к отличным от прежних климатическим ресурсам, отражаются на наследственности и разнообразии. В каждом последующем поколении потомство все больше приспосабливается к новым условиям произрастания, и его можно продвигать из агломерации с достаточно выраженным «островом тепла» в малые города, городские зеленые зоны, а в конечном итоге в тайгу.

Со ступенчатой акклиматизацией связан многоразовый селекционный отбор, который рассматривается как самостоятельный способ изучения интродуцентов, а также установления и уточнения условий использования их в культуре и базируется на определении ценных свойств породы – зимостойкости, морозоустойчивости, интенсивности роста и развития.

Наши представления о развитии интродукции видов дендрофлоры в условиях северо-восточной части Русской равнины, а также накопленный опыт стихийного переселения древесных растений в северном направлении и существенные результаты многолетних комплексных исследований успешности продвижения в северные условия Русской равнины новых видов дендрофлоры позволяют сформулировать тезисы, реализация (соблюдение) которых на практике способствует значительному повышению уровня и эффективности интродукционных испытаний хозяйственно-ценных и декоративных растений:

за начало первой ступени акклиматизации культивара принимается широта северной границы естественного ареала произрастания растения;

величина интродукционной ступени имеет флуктуирующий характер и зависит от целого комплекса факторов: географического направления перемещения растения, степени соответствия нового места культивирования условиям естественного произрастания, соблюдения интродукторами основополагающих правил лесокультурного дела с учетом имеющегося положительного опыта «стихийной» интродукции;

при перемещении видов дендрофлоры в широтном направлении величина интродукционной ступени зависит от их жизненной формы. Кустарники как более экологически пластичные и раньше вступающие в репродуктивную фазу растения возможно успешнее перемещать севернее по сравнению с деревьями;

отработку основополагающих принципов и положений методологии ступенчатой акклиматизации предпочтительно проводить на кустарниках;

с удалением места культивирования растения от северной границы его естественного ареала величина каждой последующей интродукционной ступени уменьшается;

северная граница интродукционного ареала ограничивается минимизацией климатических ресурсов городских условий, а также понижением эффективности агротехнических мероприятий (рыхление почвы, поливы, подкормки и т. п.) по уходу за растениями до уровня их гибели уже на первом этапе интродукционного испытания;

климатические условия «острова тепла» предполагаемого района культивирования должны быть близки к климатическим ресурсам северной части естественного ареала произрастания растения, а при дальнейшем продвижении последующих поколений культивара в широтном направлении – с климатическими условиями северной части предыдущей ступени.

Многолетние исследования [2–4, 9, 10, 12, 13, 36, 37, 46, 49, 54] и анализ результатов научной [40–42] и обобщение опыта стихийной интродукции позволяют логически правильно представить возможность выделения групп успешности акклиматизации и натурализации интродуцентов (см. таблицу). Каждый балл успешности представляет собой цифровое выражение степени эффективности интродукции, более высокий балл означает более высокую ее степень.

Успешность акклиматизации и натурализации видов дендрофлоры

Балл успешности	Группа успешности	Адаптивные особенности	Представители
1	Весьма выраженная деакклиматизация	Сеянцы приживаются слабо или растение погибает в ювенильный период онтогенеза	Ракитник двуцветковый (*Cytisus ratisbonensis* Schaeff.), жимолость золотистая (*Lonicera chrysantha* Turcz. ex Ledeb.), робиния обыкновенная (*Robinia pseudoacacia* L.), граб обыкновенный (*Carpinus betulus* L.) и др.
2	Выраженная деакклиматизация	Растения успешно приживаются, но меняют жизненную форму	Туя западная (*Thuja occidentalis* L.), черемуха виргинская (*Prunus virginiana* L.), боярышник алмаатинский (*Crataegus almaatensis* Pojark.) бузина красная (*Sambucus racemosa* L.) и др.
3	Средний уровень акклиматизации	Растения цветут только в наиболее благоприятных метеорологических условиях, но не плодоносят, или плодоносят, но дают семена низкого качества	Лещина обыкновенная (*Corylus avellana* (L.) H.Karst.), сосна горная (*Pinus mugo* Turra), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), бересклет бородавчатый (*Euonymus verrucosus* Scop.), орех манчжурский (*Juglans mandshurica* Maxim.) и др.
4	Высокий потенциал акклиматизации	Цветение и плодоношение по шкале В.Г. Каппера [16] – 3-4 балла, качество семян в первые годы низкое	Ель колючая (*Picea pungens* Engelm.), сосна скрученная (*Pinus contorta* Douglas ex Loudon), арония черноплодная (*Aronia melanocarpa* (Michx.) Elliott), боярышник редколесный (*Crataegus lucorum* Sarg., рис. 2), клен ясенелистный (*Acer negundo* L.) и др.

Окончание таблицы

Балл успеш-ности	Группа успешности	Адаптивные особенности	Представители
5	Успешная натура-лизация	Семенные годы наблюдаются в соответствии с биологией вида в условиях естественного ареала, цветение и плодоношение – 5 баллов, качество семян – хорошее. Растения имеют признаки натурализации: устойчивое развитие, рост и самовозобновление	Вяз гладкий (*Ulmus laevis* Pall.), вяз шершавый (*Ulmus glabra* Huds.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior* L.), сосна кедровая сибирская и др.

В первую группу включены виды, условия местопроизрастания которых по климатическим условиям в корне отличаются от климатических ресурсов региона интродукционного испытания, т. е. географически образцы данных растений при первичном испытании перемещены на значительное расстояние от экологического оптимума естественного ареала.

Интродукционный стресс растений второй группы выражается в обмерзании, фасциации их отдельных частей, приобретении многоствольности или изменении жизненной формы дерева на куст.

Периодичность и обилие цветения растений, относящихся к третьей группе, не соответствует биологии вида и сильно зависит от метеорологических условий. Плодоношение отсутствует или не превышает 1-2 баллов по шкале В.Г. Каппера.

Растения четвертой группы в первые годы развития имеют семена невысокого качества, за период онтогенеза в процессе адаптации оно повышается до уровня, характерного для данного вида.

Рис. 2. Плоды *Crataegus lucorum* Sarg

Fig. 2. *Crataegus lucorum* Sarg fruit

В пятую группу входят растения с высокой фертильностью и устойчивым плодоношением. Качество семян соответствует биологическим характеристикам вида в естественном ареале. Растения способны к самовозобновлению в новых условиях.

Растения-интродуценты в процессе онтогенеза могут приобретать новые биологические свойства и тем самым повышать свою жизнеспособность и флуктуировать в пределах выделенных групп успешности. У растений второго поколения семенного происхождения с высоким потенциалом натурализации формируются биологические свойства, характерные для «одичавших» интродуцентов.

В заключение следует отметить, что реализация обозначенных выводов и рекомендаций позволяет более результативно планировать, целенаправленно вести исследования и достовернее прогнозировать успех интродукционных испытаний древесных растений, а также формировать перспективный ассортимент видов городской дендрофлоры, наиболее адаптированных к почвенно-климатическим условиям региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Андронова М.М.* Интродуцированные виды парка «Чуглы» // Современные экологические проблемы Центрально-Черноземного региона. Вып. 2: Особо охраняемые природные территории. Интродукция растений – 2016 / под ред. Т.А. Девятовой, В.Н. Калаева, А.А. Воронина. Воронеж: Роза ветров, 2016. С. 16–20.

Andronova M.M. Introduced Species of the Chugly Park. *Modern Ecological Problems of the Central Chernozem Region. Vol. 2: Specially Protected Natural Areas. Introduction of Plants – 2016*. Ed. by T.A. Devyatova, V.N. Kalayev, A.A. Voronin. Voronezh, Roza vetrov Publ., 2016, pp. 16–20.

2. *Андронова М.М.* Ступенчатая интродукция древесных растений на севере Русской равнины: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Архангельск, 2019. 40 с.

Andronova M.M. *Stepwise Introduction of Woody Plants in the North of the Russian Plain*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2019. 40 p.

3. *Бабич Н.А., Андронова М.М.* Сосна скрученная – перспективный интродуцент для озеленения малых северных городов // Изв. вузов. Лесн. журн., 2014. № 6. С. 155–160.

Babich N.A., Andronova M.M. Lodgepole Pine – a Perspective Introduced Species for Greening of Northern Smaller Cities. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2014, no. 6, pp. 155–160. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/42f/babich.pdf

4. *Бабич Н.А., Хамитов Р.С., Хамитова С.М.* Селекция и семенная репродукция кедра сибирского. Вологда-Молочное: ВГМХА, 2014. 154 с.

Babich N.A., Khamitov R.S., Khamitova S.M. *Breeding and Seed Reproduction of Siberian Stone Pine*. Vologda-Molochnoe, Vologda SDFA Publ., 2014. 154 p.

5. *Волков А.Д., Белоногова Т.В., Курхинен Ю.П., Сазонов С.В., Шубин В.И.* Фактор биоразнообразия и комплексная продуктивность лесных экосистем северо-запада таежной зоны европейской части России. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 223 с.

Volkov A.D., Belonogova T.V., Kurkhinen Yu.P., Sazonov S.V., Shubin V.I. *Biodiversity Factor and Complex Productivity of Forest Ecosystems of the Northwest Taiga Zone of the European Part of Russia*. Petrozavodsk, KarRC RAS Publ., 2002. 223 p.

6. *Гордієнко М.І., Корецький Г.С., Маурер В.М.* Лісові культури. Кіів: Сільгоспосвіта, 1995. 328 с.

Gordienko M.I., Korecki G.S., Maurer V.M. *Forest Plantations.* Kiev, Silgosposvita Publ., 1995. 328 p.

7. *Доброхвалов В.П.* Система ступенчатой акклиматизации растений как возможная основа организации акклиматизационной работы в стране // Бюл. ГБС. 1964. Вып. 55. С. 16–26.

Dobrokhvalov V.P. Sistem of Stepwise Acclimatization of Plants as a Possible Basis for Organization of Acclimatization Work in the Country. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada*, 1964, iss. 55, pp. 16–26.

8. *Дроздов И.И., Дроздов Ю.И.* Лесная интродукция. М.: МГУЛ, 2000. 135 с.

Drozdov I.I., Drozdov Yu.I. *Forest Introduction*. Moscow, MGUL Publ., 2000. 135 p.

9. *Евдокимов И.В., Корчагов С.А., Карбасникова Е.Б., Андронова М.М.* Интродукция древесно-кустарниковых видов Дальнего Востока и Китая в дендрологическом саду Вологодской государственной молочно-хозяйственной академии им. Н.В. Верещагина // Тр. БГТУ. Лесн. хоз-во. 2016. № 1. С. 191–195.

Yevdokimov I.V., Korchagov S.A., Karbasnikova Ye.B., Andronova M.M. The Introduction of Tree and Shrub Species from the Far East and China in the Dendrological Garden of the N.V. Vereshchagin Vologda State Dairy Academy. *Trudy BGTU. Lesnoye khozyaystvo* [Proceedings of BSTU. Forestry], 2016, no. 1, pp. 191–195.

10. *Евдокимов И.В., Корчагов С.А., Карбасникова Е.Б., Андронова М.М.* Результаты интродукции дендрофлоры Южной Сибири и Монголии в дендрологическом саду ВГМХА имени Н.В. Верещагина // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2016. № 15. С. 276–279.

Evdokimov I.V., Korchagov S.A., Karbasnikova E.B., Andronova M.M. The Results of the Introduction of Dendroflora of the South Siberia and Mongolia in the Dendrological Garden VGMHA Named after N.V. Vereshchagin. *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii* [Problems of Botany of South Siberia and Mongolia], 2016, no. 15, pp. 276–279.

11. *Залывская О.С.* Интродуценты древесной и кустарниковой флоры в озеленении г. Северодвинска // Материалы VIII Молодеж. конф. ботаников в Санкт-Петербурге. СПб.: С.-Петерб. гос. ун-т технологии и дизайна 2004. С. 212–213.

Zalyvskaya O.S. Introductory Species of Tree and Shrub Flora in Landscaping of Severodvinsk. *Proceedings of the VIII Youth Conference of Botanists in Saint Petersburg*. Saint Petersburg, SPSUTD, Publ., 2004, pp. 212–213.

12. *Залывская О.С.* Качество семян интродуцентов – показатель их адаптации к новым условиям // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений: материалы VIII междунар. науч. конф. Красноярск, 2005. С. 31–33.

Zalyvskaya O.S. Quality of Seeds of Introduced Species as an Indicator of Their Adaptation to New Conditions. *Fruit Growing, Seed Production and Introduction of Woody Plants: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Krasnoyarsk, 2005, pp. 31–33.

13. *Залывская О.С.* Интродуценты древесной и кустарниковой флоры в условиях Европейского Севера (на примере г. Северодвинска): автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Архангельск, 2006. 23 с.

Zalyvskaya O.S. *Introductory Species of Tree and Shrub Flora in the European North (Case of Severodvinsk)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2006. 23 p.

14. *Ипатов Л.Ф.* Кедр на Севере: научно-популярные очерки. Архангельск, 2011. 412 с.

Ipatov L.F. *Cedar in the North: Popular Science Essays.* Arkhangelsk, 2011. 412 p.

15. *Ипатов Л.Ф., Косарев В.П., Проурзин Л.И., Торхов С.В.* Леса Соловецких островов: (по материалам лесоустройства 2003 г.). Архангельск, 2005. 60 с.

Ipatov L.F., Kosarev V.P., Prourzin L.I., Torkhov S.V. *Forests of the Solovetsky Islands: Based on the Materials of Forest Management in 2003*. Arkhangelsk, 2005. 60 p.

16. *Каппер В.Г.* Об организации ежегодных систематических наблюдений над плодоношением древесных пород // Тр. по лесн. опыт. делу. Л., 1930. Вып. 8. С. 103–139.

Kapper V.G. On the Organization of Annual Systematic Observations over the Fruiting of Tree Species. *Trudy po lesnomu opytnomu delu*, 1930, vol. 8, pp. 103–139.

17. *Кищенко И.Т.* Рост и развитие аборигенных и интродуцированных видов семейства *Pinaceae* Lindl. в условиях Карелии: автореф. дис. … д-ра биол. наук. СПб., 2000. 44 с.

Kishchenko I.T. *Growth and Development of Aboriginal and Introduced Species of the Family Pinaceae* Lindl. *in Karelia*: Dr. Biol. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 2000. 44 p.

18. Климат Вологды. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 174 с.

Climate of Vologda. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 174 p.

19. *Лыпа А.Л.* Ступенчатая акклиматизация растений как метод географических ступеней // Тез. Совещ. по теории и методам акклиматизации растений. М.; Л., 1953. С. 53–62.

Lypa A.L. Stepwise Acclimatization of Plants as a Method of Geographical Steps. *Abstracts of the Meeting on the Theory and Methods of Plant Acclimatization*. Moscow, 1953, pp. 53–62.

20. *Лыпа А.Л.* Некоторые данные из истории акклиматизации растений и ступенчатая акклиматизация // Тр. Ботан. ин-та им. В.Л. Комарова АН СССР. Сер. VI. 1957. Вып. 5. С. 131–137.

Lypa A.L. Some Data from the History of Plant Acclimatization and Stepwise Acclimatization. *Trudy botanicheskogo instituta imeni V.L. Komarova AN SSSR*, 1957, ser. VI, iss. 5, pp. 131–137.

21. *Лыпа А.Л.* Методологические и методические предпосылки к проведению работ по ступенчатой акклиматизации растений // Бюл. ГБС. 1965. Вып. 59. С. 3–8.

Lypa A.L. Methodological and Procedural Background for Stepwise Acclimatization of Plants. *Byulleten' Glavnogo botanicheskogo sada*, 1965, iss. 59, pp. 3–8.

22. *Малаховец П.М.* Интродукция древесной растительности в условиях Архангельска // Рациональное использование природных ресурсов Европейского Севера: тез. докл. к науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов, посвящ. 400-летию г. Архангельска. Архангельск: АЛТИ, 1984. С. 23–24.

Malakhovets P.M. Introduction of Woody Vegetation in Arkhangelsk. Rational Use of Natural Resources of the European North: Abstracts of the Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists, Dedicated to the 400th Anniversary of the City of Arkhangelsk. Arkhangelsk, ALTI Publ., 1984, pp. 23–24.

23. *Малаховец П.М.* Опыт интродукции древесных растений в условиях Севера и его использование в зеленом строительстве // Материалы науч.-практ. конф. (семинара) «Озеленение городов и поселков Архангельской области». Архангельск, 1999. С. 19–25.

Malakhovets P.M. Experience of Introduction of Woody Plants in Conditions of the North and Its Use in Green Construction. *Proceedings of the Scientific and Practical Conference (Seminar) "Greening of Cities and Towns of the Arkhangelsk Region"*. Arkhangelsk, 1999, pp. 19–25.

24. *Малаховец П.М., Тисова В.А.* Зимостойкость интродуцированных древесных растений в условиях Севера // Изв. вузов. Лесн. журн., 1995. № 2-3. С. 25–30.

Malakhovets P.M., Tisova V.A. Winter Hardiness of Introduced Woody Plants in Conditions of the North. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1995, no. 2-3, pp. 25–30. URL: http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1995/2-3%201995.pdf

25. Мониторинг и сохранение биоразнообразия таежных экосистем Европейского Севера России / под общ. ред. П.И. Данилова. Петрозаводск: Ин-т биологии КарНЦ РАН, 2010. 310 с.

Monitoring and Conservation of Biodiversity of Taiga Ecosystems of the European North of Russia. Ed. by P.I. Danilov. Petrozavodsk, Institute of Biology KarRC RAS Publ., 2010. 310 p.

26. *Нилов В.Н.* Интродукция древесных растений и вопросы озеленения северных населенных пунктов // Материалы отчетной сессии по итогам науч.-исслед. работ в десятой пятилетке (1976–1980). Архангельск: АИЛиЛХ, 1981. С. 59–60.

Nilov V.N. Introduction of Woody Plants and Issues of Greening of Northern Settlements. *Proceedings of the Report Session on the Results of Scientific Research Work in the tenth five-year plan (1976–1980)*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1981, pp. 59–60.

27. *Нилов В.Н.* Некоторые итоги и перспективы работ по интродукции древесных растений на таежном Севере // Проблемы повышения продуктивности лесов и перехода на непрерывное рациональное лесопользование в свете решений XXVI съезда КПСС. Архангельск: АИЛиЛХ, 1983. С. 171–173.

Nilov V.N. Some Results and Prospects of Work on the Introduction of Woody Plants in the Taiga North. *Problems of Increasing Forest Productivity and Transition to Continuous Rational Forest Management in the Light of Decisions of the XXVI Congress of the CPSU*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1983, pp. 171–173.

28. *Нилов В.Н.* Развитие работ по интродукции древесных пород на Европейском Севере // Материалы отчетной сессии по итогам науч.-исслед. работ за 1987 г. Архангельск: АИЛиЛХ. 1988. С. 29–31.

Nilov V.N. Development of Works on Introduction of Tree Species in the European North. *Proceedings of the Report Session on the Results of Scientific Research Work in 1987*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1988, pp. 29–31.

29. *Нилов В.Н.* Программа по интродукции древесных пород на Европейский Север // Вопросы интродукции хозяйственно-ценных древесных пород на Европейский Север. Архангельск: АИЛиЛХ, 1989. С. 14–34.

Nilov V.N. The Program for the Tree Species Introduction to the European North. *Issues of Introduction of Economically Valuable Tree Species to the European North*. Arkhangelsk, AILiLKh Publ., 1989, pp. 14–34.

30. *Нилов В.Н.* Введение новых ценных деревьев и кустарников в культуру на Севере // Северные леса: состояние, динамика, антропогенное воздействие: междунар. симп. Архангельск, 16–26 июля 1990 г. Ч. II. М., 1990. С. 140–147.

Nilov V.N. Introduction of New Valuable Trees and Shrubs into Forest Plantings in the Russian North. *International Symposium "Northern Forests: Condition, Dynamics, Anthropogenic Impacts". Arkhangelsk, July 16–26, 1990*. Moscow, 1990, part II, pp. 140–147.

31. *Орлов Ф.Б.* Интродукция древесной растительности на Севере // Лесн. хоз-во. 1953. № 12. С. 39–42.

Orlov F.B. Introduction of Woody Vegetation in the North. *Lesnoye khozyaystvo*, 1953, no. 12, pp. 39–42.

32. *Орлов Ф.Б.* Предварительные результаты интродукции древесных и кустарниковых пород в дендрарии АЛТИ // Тр. АЛТИ. Архангельск, 1957. Т. XVII. С. 150–159.

Orlov F.B. Preliminary Results of the Introduction of Tree and Shrub Species in the ALTI Arboretum. Arkhangelsk. *Trudy ALTI*, 1957, vol. XVII, pp. 150–159.

33. *Орлов Ф.Б., Тарабрин В.П., Малаховец П.М.* Некоторые вопросы акклиматизации и интродукции деревьев и кустарников в условиях Севера // Тр. АЛТИ. Т. XXI. Архангельск, 1969. С. 24–29.

Orlov F.B., Tarabrin V.P., Malakhovets P.M. Some Issues of Acclimatization and Introduction of Trees and Shrubs in the North. *Trudy ALTI*, 1969, vol. XXI, pp. 24–29.

34. *Рубцов В.И., Самошкин Е.Н.* Интродукция древесных растений – важнейший путь увеличения биологического разнообразия лесных экосистем // Изв. вузов. Лесн. журн. 1997. № 1-2. С. 44–47.

Rubtsov V.I., Samoshkin E.N. Introduction of Woody Plants – the Most Important Way to Increase the Biological Diversity of Forest Ecosystems. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1997, no. 1-2, pp. 44–47. URL: http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1997/1-2%201997%20ЛЕСНОЙ%20ЖУРНАЛ.pdf

35. *Соколова Е.Б.* Качество семян ели колючей серебристой формы, произрастающей в урбанизированной среде г. Вологды // Аграрная наука – сельскохозяйственному производству. Т. 3. Биологические науки: сб. тр. ВГМХА по результатам науч.-метод. конф., посвящ. 97-летию академии. Вологда-Молочное: ВГМХА, 2008. С. 37–38.

Sokolova E.B. Quality of Seeds of Silver Blue Spruce Growing in the Urbanized Environment of Vologda. *Agrarian Science for Agricultural Production. Vol. 3. Biological Sciences. Collection of Academic Papers of VSDFA on the Results of the Scientific and Methodological Conference Dedicated to the 97th Anniversary of the Academy*. Vologda-Molochnoe, VSDFA Publ., 2008, pp. 37–38.

36.*Соколова Е.Б.* К вопросу об интродукции древесной и кустарниковой растительности в городской среде // Проблемы и перспективы развития растениеводства и лесного дела в современных условиях. Вологда-Молочное: ВГМХА, 2008. С. 126–128.

Sokolova E.B. To the Issue of the Introduction of Tree and Shrub Vegetation in the Urban Environment. *Problems and Prospects of the Development of Plant Breeding and Forestry in Modern Conditions*. Vologda-Molochnoe, VSDFA Publ., 2008, pp. 126–128.

37. *Соколова Е.Б.* Древесная и кустарниковая растительность в Юго-Западном интродукционном районе (на примере г. Вологды): автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Архангельск, 2010. 20 с.

Sokolova E.B. *Tree and Shrub Vegetation in the South-Western Introduction Region (Case of Vologda)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2010. 20 p.

38. *Трубин Д.В., Ипатов Л.Ф.* Рост лиственницы на Соловецких островах // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение: межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛТА, 1982. С. 23–26.

Trubin D.V., Ipatov L.F. Growth of Larch on the Solovetsky Islands. *Forestry, Forest Plantations and Soil Science: Interuniversity Collection of Academic Papers*. Leningrad, LTA Publ., 1982, pp. 23–26.

39. *Фокина Т.Л.* Ботанический сад Соловецкого музея-заповедника // Совет ботанических садов России: информ. бюл. 1997. Вып. 5. С. 6–10.

Fokina T.L. Botanical Garden of Solovetsky Museum-Reserve. *Sovet botanicheskikh sadov Rossii: Informatsionnyy byulleten'* [Council of the Botanical Gardens of Russia: Newsletter], 1997, iss. 5, pp. 6–10.

40. *Хамитов Р.С.* Влияние географической изоляции на структуру популяций кедра сибирского по форме семенной чешуи // Вестн. КрасГАУ, 2013. № 11(86). С. 217–220.

Khamitov R.S. Geographical Isolation Influence on the Structure of Siberian Cedar Populations on the Seed Scale Form. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2013, no. 11(86), pp. 217–220.

41. *Хамитов Р.С.* Интродукция сосны кедровой сибирской на генетико-селекционной основе в таежную зону Восточно-Европейской равнины: автореф. дис. … д-ра с.-х. наук. Вологда, 2015. 41 с.

Khamitov R.S. *Introduction of Siberian Pine on a Genetic and Breeding Basis to the Taiga Zone of the East European Plain*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Vologda, 2015. 41 p.

42. *Хамитов Р.С., Хамитова С.М.* Плодоношение кедра сибирского в Чагринской кедровой роще // Аграрная наука – сельскому производству. Т. 3. Биологические науки: сб. тр. ВГМХА по результатам науч.-практ. конф., посвящ. 97-летию академии. Вологда-Молочное: ВГМХА, 2008. С. 44–45.

Khamitov R.S. Khamitova S.M. Fruiting of Siberian Stone Pine in the Chagrino Cedar Grove. *Agrarian Science for Agricultural Production. Vol. 3. Biological Sciences. Collection of Academic Papers of VSDFA on the Results of the Scientific and Methodological Conference Dedicated to the 97th Anniversary of the Academy*. Vologda-Molochnoe, VSDFA Publ., 2008, pp. 44–45.

43. *Хрущева С.В.* Оценка состояния дендрофлоры насаждений искусственного происхождения (на примере г. Новодвинска): автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Архангельск, 2010. 20 с.

Khrushcheva S.V. *Dendroflora State Assessment of Artificial Plantations (Case of Novodvinsk)*: Cand. Agric. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2010. 20 p.

44. *Юрцев Б.А.* Эколого-географическая структура биологического разнообразия и стратегия его учета и охраны // Биологическое разнообразие: подходы к изучению и сохранению. СПб.: Зоол. ин-т РАН. 1992. С. 7–21.

Yurtsev B.A. Ecological and Geographical Structure of Biological Diversity and Strategy of Its Accounting and Protection. *Biological Diversity: Approaches to Study and Conservation*. Saint Petersburg, Institute of Zoology RAS Publ., 1992, pp. 7–21.

45. Barrio I.C., Hik D.S. Herbivory in Arctic Ecosystems. *Encyclopedia of the World's Biomes*. Oxford, Elsevier, 2020, pp. 446–456. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11791-9

46. Berra E.F., Gaulton R. Remote Sensing of Temperate and Boreal Forest Phenology: A Review of Progress, Challenges and Opportunities in the Intercomparison of In-Situ and Satellite Phenological Metrics. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 480, art. 118663. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118663

47. Demidova N.A., Eriksson G. Genetic Variation in Growth Characteristics of *Hippophae rhamnoides* L. Grown under Controlled Conditions. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2018, no. 5, pp. 26–37. DOI: https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.26

48. Duan M., House J., Chang S.X. Understory Plant Communities Vary with Tree Productivity in Two Reclaimed Boreal Upland Forest Types in Canada. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 453, art. 117577. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117577

49. Falck H., Mikhaylov K.L., Demidova N.A. Wood Waste Potential as Forestry Competitive Advantage (By the Example of the Arctic Inland Territories of the Russian European North). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 6, pp. 280–289. DOI: https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.280

50. Haas J.C., Street N.R., Sjödin A., Lee N.M., Högberg M.N., Näsholm T., Hurry V. Microbial Community Response to Growing Season and Plant Nutrient Optimisation in a Boreal Norway Spruce Forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 125, pp. 197–209. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.07.005

51. Haeussler S., Bedford L., Leduc A., Bergeron Y., Kranabetter J.M. Silvicultural Disturbance Severity and Plant Communities of the Southern Canadian Boreal Forest. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, no. 1, pp. 307–327. DOI: https://doi.org/10.14214/sf.565

52. Hedayat K.M., Lapraz J.-C. Chapter 16 – Introduction to the Usage of Medicinal Plants. *The Theory of Endobiogeny*. Vol. 1: Global Systems Thinking and Biological Modeling for Clinical Medicine. Academic Press, 2019, pp. 255–266. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816903-2.00016-1

53. Kiehl K. Plant Species Introduction in Ecological Restoration: Possibilities and Limitations. *Basic and Applied Ecology*, 2010, vol. 11, iss. 4, pp. 281–284. DOI: https://doi.org/10.1016/j.baae.2010.02.008

54. Łopucki R., Klich D., Kitowski I., Kiersztyn A. Urban Size Effect on Biodiversity: The Need for a Conceptual Framework for the Implementation of Urban Policy for Small Cities. *Cities*, 2020, vol. 98, art. 1002590. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.102590

55. McBride J.R., Douhovnikoff V. Characteristics of the Urban Forests in Arctic and Near-Arctic Cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, vol. 11, iss. 2, pp. 113–119. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.07.007

56. Ren Y., Ge Y. Ma D., Song X., Shi Y. Pan K., Qu Z., Guo P., Han W., Chang J. Enhancing Plant Diversity and Mitigating BVOC Emissions of Urban Green Spaces Through the Introduction of Ornamental Tree Species. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, vol. 27, pp. 305–313. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.08.011

57. Sjöman H., Östberg J., Bühler O. Diversity and Distribution of the Urban Tree Population in Ten Major Nordic Cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2012, vol. 11, iss. 1, pp. 31–39. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.09.004

58. Widenfalk O., Weslien J. Plant Species Richness in Managed Boreal Forests – Effects of Stand Succession and Thinning. *Forest Ecology and Management*, 2009, vol. 257, iss. 5, pp. 1386–1394. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.12.010

59. Yang J., Cooper D.J., Li Z., Song W., Zhange Y., Zhao B., Han S., Wang X. Differences in Tree and Shrub Growth Responses to Climate Change in a Boreal Forest in China. *Dendrochronologia*, 2020, vol. 63, art. 125744. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125744

STEPWISE INTRODUCTION OF DENDROFLORA SPECIES TO THE NORTHEASTERN PART OF THE RUSSIAN PLAIN (REVIEW)

Nikolay A. Babich*[1]*, *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: G-7384-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7463-2519*
Elena B. Karbasnikova*[2]*, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: AAH-6250-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2850-9362*
Marina M. Andronova*[3]*, *Doctor of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: AAB-4480-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9654-8913*
Olga S. Zalyvskaya*[1]*, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: AAY-4901-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7520-6295*
Yuliya V. Aleksandrova*[1]*, *Postgraduate Student; ResearcherID: AAH-4016-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2802-1124*
Nikolay P. Gayevskiy*[1]*, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.*
[1]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: forest@narfu.ru
[2]Vologda State Dairy Farming Academy named after V.N. Vereshchagin, ul. Shmidta, 2, s. Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: helen15@yandex.ru
[3]Vologda Institute of Law and Economics of the Federal Penal Service of Russia, ul. Shchetinina, 2 a, Vologda, 160002, Russian Federation; e-mail: mary1969@yandex.ru

Abstract. Introduction of economically valuable and ornamental species has long been one of the main methods of increasing the biological diversity of dendroflora. The aim of the research is to develop the theory of stepwise introduction of dendroflora species in the northern direction. The methodological basis of research was the works of experts in the field of forest introduction, including northern specialists, such as F.B. Orlov, P.M. Malakhovets, V.N. Nilov, N.A. Demidova, O.S. Zalyvskaya, E.B. Karbasnikova, M.M. Andronova, etc. The article is mostly theoretical and describes the development of the introduction of tree and shrub species in the harsh conditions of the northeastern part of the Russian Plain. Analysis of the results of scientific and spontaneous introduction allowed us to formulate a working hypothesis on the possibility of implementing a stepwise introduction of dendroflora valuable species due to the special microclimate formed in cities with a higher level of temperature regime compared to the periphery. It is assumed that the thermal resource of heat islands should be enough for successful acclimatization of cultivars, promotion of their seed offspring to suburban conditions with subsequent naturalization. Statements covering the main aspects of stepwise introduction development have been formulated based on long-term research. These are the beginning of the first stage of acclimatization, factors influencing the duration of the introduction stage, priority material for processing the basic principles of stepwise introduction, limiting factors of the northern border of the introduction range, compliance of the conditions of heat islands with the conditions of the northern part of the previous introduction stage. Practical implementation of these statements will increase the efficiency of acclimatization tests of introduced plant species. A table of the acclimatization success and naturalization of dendroflora species, taking into account different stages of ontogenesis, was proposed in order to objectively evaluate the results of experiments. Synthesis of conclusions and recommendations contributes to targeted plant adaptation measures and the formation of reliable predictions of their naturalization.
For citation: Babich N.A., Karbasnikova E.B., Andronova M.M., Zalyvskaya O.S., Aleksandrova Yu.V., Gayevskiy N.P. Stepwise Introduction of Dendroflora Species to the Northeastern Part of the Russian Plain (Review). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 73–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85

Keywords: stepwise introduction, plant acclimatization, naturalization, working hypothesis, dendroflora, introduction tests.

Поступила 25.01.20 / Received on January 25, 2020

УДК 630*181.7:630*231.332:630*174.7.754
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-86-100

СЕЗОННЫЙ РОСТ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ НА ЗАБОЛОЧЕННЫХ ПОЧВАХ СЕВЕРА

Л.В. Зарубина, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID: AAG-8579-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3834-0521*
Р.С. Хамитов, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID: Z-1461-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1490-3553*
Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н.В. Верещагина, ул. Шмидта, д. 2, с. Молочное, г. Вологда, Россия, 160555;
e-mail: Liliya270975@yandex.ru, renatkhamitov@yandex.ru

Аннотация. В 33-летнем кустарничково-сфагновом сосняке северотаежной природно-климатической зоны у сосны обыкновенной изучена сезонная ритмика роста молодых побегов в высоту в комплексе с основными физиологическими процессами, определена возможность регулирования их интенсивности дополнительным внесением азотного удобрения. Установлено, что на Севере на гидроморфных избыточно увлажненных почвах сезонный рост сосны в высоту с максимальной скоростью происходит в конце июня и начале июля, когда повышается температура воздуха, а корневая система освобождается от избыточного увлажнения. В отличие от сосняков лишайниковых, в которых корни сосны не подвергаются действию затопления, на гидроморфных торфяных почвах сосна растет значительно медленнее и в течение вегетационного периода имеет менее выраженную, чем в сосняках лишайниковых, интенсивность физиологических процессов. Невысокая скорость роста побегов и физиологических процессов у сосны в сфагновых лесорастительных условиях объясняется нарушением работы ее корневой системы в результате почвенной аноксии, вызываемой затоплением, а также недостаточным снабжением растущих побегов энергопластическими веществами из кроны в результате нарушения их нормального оттока и передвижения в дереве. Азот позитивно влияет на ростовые и физиологические процессы у сосны в сфагновых типах леса. Однако его действие в данных лесорастительных условиях проявляется значительно слабее, чем в сухих лишайниковых борах Крайнего Севера. На заболоченных торфяных почвах под влиянием азотного удобрения на 20 % усиливается сезонный рост сосны в высоту, на 8–10 дней увеличивается продолжительность сезонного роста побегов, существенно повышается интенсивность фотосинтеза, в результате сокращения расхода воды на транспирацию нормализуется водный режим дерева и возрастает ее продуктивность. Эти позитивные изменения, происходящие под действием азота, в конечном счете повышают жизнеспособность и продуктивность сфагновых сосняков.
Для цитирования: Зарубина Л.В., Хамитов Р.С. Сезонный рост сосны обыкновенной на заболоченных почвах Севера // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 86–100. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-86-100

Ключевые слова: сосна обыкновенная, сосняк сфагновый, влажность почвы, азотное удобрение, физиологические процессы, сезонный рост побегов.

Введение

Основными факторами, определяющими жизненное состояние, продолжительность роста и работу фотосинтетического аппарата у сосны в сфагновых типах леса, являются погодные условия и условия корневого питания. Избыточная

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

влажность почвенного слоя, бедность минеральными элементами, несмотря на богатство органикой, у сосны в сфагновых типах лесорастительных условий, модифицируя работу корневой системы, вызывают ее преждевременное отмирание и, как следствие, изменяют в худшую сторону весь ход физиологических и ростовых процессов в надземной и подземной частях дерева, уровни их суточных и сезонных ритмов, нарушают апикальную доминантность побегов, негативно отражаются на продуктивности древостоев [6, 7, 11–23, 26, 29, 32–39]. Считается, что для интенсивного роста сосна нуждается в относительно высоком уровне азотного обеспечения [30], поэтому в лесных насаждениях для повышения темпов роста и продуктивности древостоев первостепенным мероприятием является дополнительное внесение в почву азота, на заболоченных местностях оно сопровождается предварительным осушением.

Вопросы влияния азотных удобрений на годичный прирост в высоту и физиологию деревьев изучались многими исследователями [1, 2, 9–13, 15–17, 29, 30, 34, 36, 38]. Учитывая опыт (более 5 лет) этих работ, можно было сделать предположение о положительном воздействии азота на рост сосны в холодном северотаежном лесорастительном регионе. Однако ход сезонного роста и фотосинтез деревьев под влиянием удобрений в целом изучены крайне слабо [1, 10, 12, 15–17, 29, 30, 34–38], что не позволяет делать однозначных выводов. Роль удобрений для данных процессов у сосны в сфагновых типах леса с их неустойчивым уровнем почвенно-грунтовых вод почти не изучалась [29, 34, 38], а в обширном северном регионе Архангельской области такие исследования до последнего времени не проводились. В то же время расшифровка (раскрытие) механизма влияния удобрений на рост и метаболизм сосны на заболоченных почвах остается одной из приоритетных задач современного лесоведения и биологической науки и, помимо теоретического значения, представляет определенную практическую значимость, особенно при разработке мероприятий по ускорению роста деревьев и повышению продуктивности древостоев.

Цель исследования – изучение сезонного роста сосны в сфагновых условиях местопроизрастаний после внесения азотных удобрений.

Объекты и методы исследования

Опыты проводились в 2017–2019 гг. на территории зеленой зоны г. Архангельска, 64°45′ с. ш. В качестве объекта исследований использован 33-летний сосняк кустарничково-сфагновый, занимающий значительную часть бывшего экспериментального участка «Опытное поле» акад. И.С. Мелехова, сформировавшийся из подроста сосны на месте вырубки материнского древостоя. Опытное насаждение относится к гидроморфному экологическому ряду лесов с избыточным увлажнением. В 1947 г. ручным способом на нем был вырыт одиночный осушительный канал, который в настоящее время захламлен упавшими в него деревьями и не работает. Состав опытного древостоя 10С, густота – около 2,0 тыс. экз./га, высота сосны – 1,6 м. Почва – мощный торфяник (более 3 м) верхового типа заболачивания, подстилаемый тяжелым суглинком. Динамика уровня почвенно-грунтовых вод (УПГВ) в летний период значительная. Мозаичный рельеф сложный: редкие мочажины перемежаются с возвышенными участками, занятыми моховой растительностью, синузиями багульника, подбела, кассандры, голубики, морошки, сосной.

В ходе решения поставленной задачи были подготовлены 2 опытные площадки для внесения в них удобрения. Контролем служил аналогичный участок неудобренного сосняка. На каждой площадке и в контроле было подобрано и пронумеровано по 10 деревьев сосны I и II классов роста (по Крафту), характеризующихся сходной величиной годичного прироста осевых и боковых побегов за последние годы. Это позволяло получать данные с точностью 3–5 %. В целях проведения наблюдений за расположением УПГВ на каждой опытной площадке и в контроле было подготовлено по 2 смотровые скважины, нулевые отметки на которых установлены согласно проведенной нивелировке.

У модельных деревьев методом непосредственного измерения с помощью ученической линейки, начиная при каждом новом измерении от нулевой отметки, и фотографирования изучали сезонный ход роста верхушечного и осевого побегов на первой боковой мутовке, степень влияния на них азотного удобрения с одновременным учетом расположения УПГВ и состояния погоды. Наряду с изучением сезонного роста побегов велись также работы по выяснению влияния азотного удобрения и УПГВ на основные показатели энергетического метаболизма деревьев. Это давало возможность выявить характер взаимосвязи между ходом роста молодых побегов, фотосинтетической способностью ассимиляционного аппарата и процессами его морфогенеза при воздействии азотного удобрения и УПГВ. В число изучаемых параметров физиологических процессов входили интенсивность фотосинтеза и транспирации, интенсивность дыхания у отчужденных от дерева корней. Последнее положение, однако, не противоречило работе с отчужденными корнями как с интактными [18]. Интенсивность фотосинтеза замерялась радиометрическим методом с помощью радиоуглеродной метки [5] при удельной радиоактивности газовой смеси в замкнутой системе 0,2 МБк/л, интенсивность транспирации – методом быстрого взвешивания срезанных под парафином побегов [8], митохондриальное дыхание корней – методом учета выделяющегося CO_2 [3]. Наблюдения за ростом молодых побегов проводили каждые 1–3 дня от фенофазы начала роста побегов до фенофазы окончания их роста, интенсивность физиологических процессов измеряли 3–5 раз в месяц. В эти же сроки определялись напряженность лучистой энергии, положение УПГВ, температура воздуха и почвы, состояние погоды.

Для подкормки сосны было использовано азотное удобрение в виде карбамида (содержание азота 46 %) как наиболее легко усваиваемое растениями, значительно ускоряющее фотосинтез и экспорт из листьев ассимилятов [15, 17, 21–23, 25]. Удобрение внесено в почву вручную 5 июня 2017 г. на 2 специально подготовленных для этого площадках размером 30×30 м в дозе 180 кг действующего вещества/га. Поскольку деревья небольшие по размеру, а рельеф участка мозаичный, было решено удобрять не всю площадь пробы, а лишь отдельные деревья. Согласно проведенным расчетам, с учетом принятой в опыте дозы азота для одного дерева требовался 1 кг технического удобрения, или 460 г действующего вещества. Почвенные анализы показали, что содержание общего азота в почвенной толще 5–10 см до внесения удобрения составляло 2,01 %, в толще 10–20 см – 2,10 %. Его содержание после внесения удобрения в указанных слоях почвы в конце первого летнего сезона возросло до 2,58 и 2,50 % соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение

Год внесения удобрений (2017). Май был холодным и влажным, с низкими положительными температурами и плотной облачностью, длительной верховодкой на болотах, поэтому в данном месяце все растения на опытном участке продолжали находиться в состоянии зимнего покоя. В начале июня сохранялась холодная и пасмурная погода. Уровень почвенной воды на опытном объекте располагался в непосредственной близости к поверхности, иногда образуя верховодку. Температура воздуха днем составляла 8–12 °С, в ночные часы не превышала 3–7 °С. В последующие сутки и всю вторую декаду июня также было холодно и пасмурно, почти ежедневно выпадали осадки, нередко с мокрым снегом, поэтому почва в опытном сосняке оттаивала медленно и характеризовалась как избыточно увлажненная. Из-за низких температур в весенний период исследуемые деревья долгое время не трогались в рост. Первые явные признаки набухания вегетативных почек и разрушения на них покровных чехликов обозначились только к 10 июня, что оказалось почти на месяц позже обычных сроков. В литературе не раз отмечалось [15–17], что на Севере под влиянием погодных условий у сосны возможен сдвиг начала и окончания роста побегов. В нашем опыте задержку работы апикальной меристемы и сдвиг начала роста молодых побегов у сосны вызвали продолжительное весеннее похолодание и корневая аноксия. Холодная и пасмурная погода с моросящими дождями простояла до 18 июня. В этот период дневная температура воздуха составляла примерно 7,5–15,5 °С и лишь эпизодически повышалась до 21 °С. УПГВ оставался в непосредственной близости к поверхности. Поэтому молодые побеги росли в высоту очень медленно. К 18 июня длина верхушечного побега у сосны на участке с азотом составляла 7,3 см, в контроле – 5,7 см, осевого побега на первой боковой мутовке – соответственно 5,0 и 4,3 см (рис. 1).

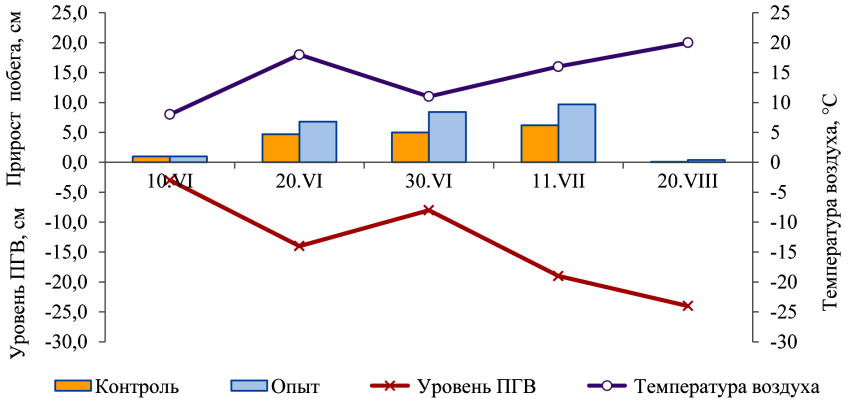


Рис. 1. Динамика сезонного прироста сосны в сосняке сфагновом при естественном и повышенном уровне азотного питания в 2017 г.

Fig. 1. Seasonal growth dynamics of pine in a sphagnum pine forest with a natural and increased level of nitrogen nutrition in 2017

С 18 июня температура воздуха повысилась до 19 °С, температура почвы в толще 0–10 см – до 10 °С, ПГВ опустились на глубину ниже 14 см. Известно, что на Севере корни сосны и ели трогаются в рост при 3–5 °С, начинают активно расти при 8–9 °С [2]. Оптимальная температура для работы ассимиляционного аппарата у хвойных пород равна 18–23 °С [16, 29], поэтому предполагалось, что пришедшее потепление активизирует работу корневой системы и ассимиляционного аппарата сосны и тем самым ускорит рост ее побегов. Однако сохранявшиеся до 2 июля высокие УПГВ и влажность торфяного слоя (92 %) задерживали нормальную работу корней и ассимиляционного аппарата. В результате побеги у сосны росли очень медленно. Общая длина верхушечного побега к указанному числу в опыте составила 15,7 см, в контроле – до 10,7 см, осевого побега на первой боковой мутовке – 10,5 и 9,0 см соответственно. За 14 сут. (18.06–2.07) длина верхушечного побега у опытных растений увеличилась лишь на 8,4 см, в контроле – на 5,0 см, осевого побега на первой боковой мутовке – соответственно на 5,5 и 4,7 см (рис. 1).

С 3 июля потеплело, небо просветлело, температура воздуха повысилась до 23–28 °С, температура почвы в корнеобитаемом слое – до 10,5–13 °С. ПГВ на участке опустились на глубину ниже 20 см от поверхности, влажность верхнего 10-сантиметрового торфяного слоя уменьшилась с 92 до 87 %. Такие характеристики природных факторов на опытном участке сохранялись до окончания роста побегов (11.07) и существенно активизировали работу корней и ассимиляционного аппарата, что положительно сказалось на росте побегов. В этот период дыхание мелких корней в контроле повысилось с 0,52±0,06 до 1,16±0,10 мг, в опыте – с 0,67±0,08 до 1,49±0,12 мг CO_2/(г·ч), интенсивность фотосинтеза возросла с 11,7±0,96 до 15,8±1,04 мг и с 13,9±1,16 до 20,7± ±1,13 мг CO_2/(г·ч) соответственно. Достоверность разницы средних значений между опытом и контролем для критерия Съюдента ($t_{st.0,95}$) составила по дыханию корней 4,3 и 4,9 по интенсивности фотосинтеза – 3,2 и 4,7 соответственно. Разница в приросте побегов между опытными растениями (N_{180}) и контролем начала существенно возрастать. Так, за период со 2 по 11 июля дополнительный прирост верхушечного побега в опыте составил 9,7 см, в контроле – 6,2 см, осевого побега на первой боковой мутовке – 5,0 и 3,2 см соответственно. В результате почти половина всего дополнительного прироста молодых побегов у сосны от внесенных в почву удобрений в первый год образовалась в конце периода интенсивного роста, то есть в конце июня – начале июля, когда создались необходимые температурные и почвенные условия для активной работы корней и ассимиляционного аппарата (рис. 1).

К концу общего периода роста (11.07) средняя длина осевого апикального побега (согласно проведенным замерам у 10 модельных образцов в каждом варианте) в контроле составляла 16,9 см, в опыте – 25,4 см, на боковых ветвях первой мутовки – 15,5 и 12,2 соответственно (см. таблицу). Дополнительный прирост верхушечного побега у опытных растений за счет действия азота был 8,5 см, осевого побега на боковых ветвях первой мутовки – 3,3 см. В обоих случаях разница между удобренными деревьями и контролем оказалась существенной и по критерию Стъюдента превышала необходимый уровень $t \geq 3$. По сравнению с двумя предыдущими, особенно теплыми, годами, длина

главного осевого побега у контрольных сосен в сырой и холодный 2017 г. была существенно ниже (16,9±1,11 см). В 2016 г. она составляла 22,4±0,83 см, в 2015 г. – 23,6±0,77 см. У отдельно взятого дерева сосны, удобренного 17 июня 2016 г. аналогичной дозой азота, длина верхушечного побега в первый год была 26,0 см, в контроле – 22,4 см, на второй год (2017) – соответственно 40,5 и 16,9 см. За счет действия удобрения длина побегов в эти годы увеличилась соответственно на 3,6 и 23,6 см. Причиной слабой реакции опытного дерева на внесенное удобрение в 2016 г. несмотря на теплую погоду, видимо, явилась поздняя (17.06) подкормка его удобрением.

Влияние азота на сезонный рост в высоту и скорость физиологических процессов сосны в сосняке сфагновом

Период наблюдений	УПГВ, см	Прирост гл. побега, см		Фотосинтез, мг CO_2/(г·ч)		Транспирация, мг H_2O/(г·ч)	
		Контроль	N_{180}	Контроль	N_{180}	Контроль	N_{180}
2017 г.							
Июнь	3–10	10,7	15,7	11,7±0,96	14,9±1,16	157±8	144±8
Июль	8–21	6,2	9,7	18,8±1,04	20,7±1,13	162±13	159±12
Общий прирост		16,9	25,4	15,8±1,12	17,8±1,17	160±11	152±13
2018 г.							
Май	5–14	3,8	5,9	11,0±0,67	12,3±0,67	134±6	124±8
Июнь	12–22	6,5	9,8	20,4±1,12	23,8±1,12	166±12	155±10
Июль	8–38	0	2,3	20,3±1,09	24,3±1,09	279±14	243±9
Общий прирост		10,3	18,0	17,3±1,22	20,1±1,39	193±17	174±13
2019 г.							
Май	3–14	3,8	4,7	–	–	148±11	139±6
Июнь	14–18	8,0	14,6	–	–	177±10	159±10
Июль	15–18	0,1	0,3	–	–	166±10	146±11
Общий прирост		11,9	19,6	–	–	163±13	148±12

Несмотря на то, что в 2017 г. температура воздуха после завершения периода роста побегов (11.07) еще долгое время оставалась достаточно высокой (17,5–26,0 °С), а корни сосны были свободными от затопления, линейный рост побегов к этому сроку уже закончился, причем одновременно в контроле и в опыте. Лишь в конце июня, перед самым завершением вегетации, когда на контроле рост побегов начал активно замедляться, на опытных площадках он продолжал оставаться весьма существенным. Так, за 7 сут. (с 28.06 по 4.07) дополнительный прирост главного осевого побега в контроле в среднем составил 4,8 см, в опыте – 10,1 см, на боковых ветвях первой мутовки – соответственно 3,5 и 5,5 см. После завершения периода роста на вершине молодых побегов сформировались вегетативные почки прироста следующего года. Размер их на центральном побеге у опытных деревьев составлял 10–12 мм, в контроле 8–9 мм. В первый год после внесения удобрения у опытных растений не удалось зарегистрировать ярко выраженного продления сезонного роста побегов по сравнению с контролем, которое в своих опытах наблюдал И.Т. Кищенко [10].

Второй год (2018) после внесения удобрений. Первые признаки набухания и освобождения вегетативных почек от покровных

чехликов на побегах обозначились очень рано, уже 19–20 мая после наступившего потепления, или на 3 недели раньше, чем в 2017 г., что соответствовало обычным срокам начала вегетации сосны на Севере [17]. Крупные почки у опытных растений интенсивно набухали, новообразование и видимый рост молодых побегов на них начались на 1-2 дня раньше, чем в контроле. Вторая декада и начало третьей декады мая также характеризовались относительно теплой и солнечной погодой. Температура воздуха днем сохранялась на уровне 20–24 °С, ночью – 5–8 °С. В конце месяца длина верхушечного побега у опытных растений составляла 5,9 см, в контроле – 3,8 см (рис. 2, таблица).

С 25 мая установилась сухая, но холодная погода с дневными температурами 5–14 °С и ночными 1–5 °С. Холодная с плотной облачностью ненастная погода, нередко с выпадением снега и ночными заморозками, простояла до середины июня и предопределила слабый рост сосны в это время. УПГВ весь период располагался вблизи поверхности почвы (8–13 см), чем ограничивал нормальную работу корней и ассимиляционного аппарата сосны. К 15 июня потеплело, температура воздуха днем повысилась до 15–17 °С, затем до 21–24 °С, ночью до 5–12 °С. Однако затопленная почва продолжала оставаться холодной. Температура в корнеобитаемом слое не превышала 6,5–7 °С. Как показали результаты замеров, 16 июня длина верхушечного побега у сосны в опыте была 13,0 см, в контроле – 8,8 см (рис. 2).

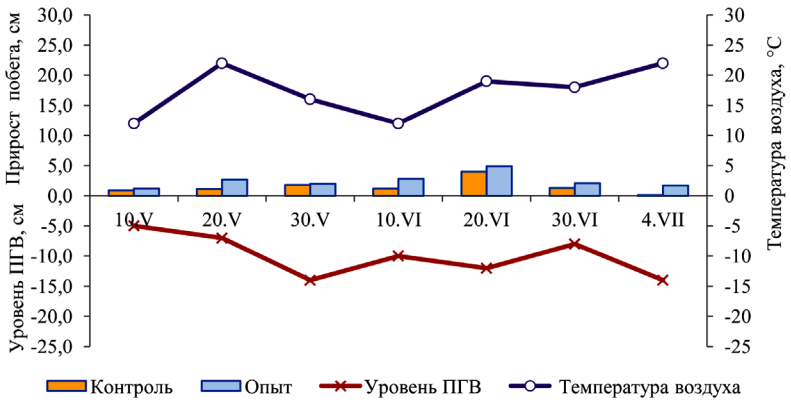


Рис. 2. Динамика сезонного прироста сосны в сосняке сфагновом при естественном и повышенном уровнях азотного питания в 2018 г.

Fig. 2. Seasonal growth dynamics of pine in a sphagnum pine forest with a natural and increased level of nitrogen nutrition in 2018

Затем начались интенсивные грозовые и ливневые дожди. Несмотря на осадки, температура воздуха не опускалась ниже 18–24 °С, в слое почвы 0–20 см – ниже 11–14 °С. В результате за 15 сут. в период с 16 по 30 июня длина верхушечного побега в опыте увеличилась на 2,8 см, в контроле – на 1,5 см, или за сутки возросла на 1,9 и 1 мм соответственно (рис. 2). С 30 июня произошло кратковременное похолодание, однако ливневые дожди не прекращались. В этот период УПГВ располагался в 5–8 см от поверхности. С 4 июля воздух прогрелся днем до 22,5 °С, ночью – до 14 °С, а с 11 июля установилась сухая жаркая погода с дневными температурами 25–29 °С. Однако это уже не влияло

на рост молодых побегов, поскольку его активная фаза (с видимым результатом) к данному сроку уже закончилась, началось формирование ассимиляционного аппарата.

В 2018 г. формирование верхушечного побега у сосны в контроле закончилось 24.06, на площадках с дополнительным азотным питанием – 4.07, или в опыте на 10 дн. позже, чем в контроле. За эти 10 сут. длина главного побега у сосны на опытных площадках дополнительно увеличилась еще на 2,3 см. К периоду полного окончания роста длина верхушечного побега в контроле составляла 10,3±0,4 см, в опыте 18,0±0,6 см (таблица). Разница оказалась статистически достоверной ($t = 7,4$ при $t_{st.0,95} = 2,8$). Несмотря на раннее начало роста, длина осевого побега у сосны в 2018 г. по сравнению с 2017 г. уменьшилась в контроле на 6,6 см, в опыте – на 8,4 см. Различие статистически значимо ($t \geq 3$ при $t_{0,95} = 2,2$).

Можно отметить, что погодные условия 2018 г. для роста сосны оказались более благоприятными по сравнению с 2017 г., особенно в начале вегетационного периода, а заложившиеся осенью 2017 г. на побегах вегетативные почки были достаточно крупными, интенсивность фотосинтеза и транспирации в августе сохранялась относительно высокая. Это предопределяло хороший рост побегов в 2018 г. Как показали дальнейшие исследования, в 2018 г. рост сосны в высоту оказался значительно хуже, чем в 2017 г. Причиной стали очень плохие погодные условия в мае–июле предыдущего года и в июне текущего года: растениями было накоплено недостаточное количество запасных веществ (крахмала). Считается, что у сосны величина прироста побегов в текущем году в первую очередь определяется погодными условиями [24] и условиями ассимиляции [16] предыдущего года, создающими запасы резервных веществ. Замеры показали, что на удобренных площадках прирост верхушечного побега у сосны по отношению к контролю в первый год увеличился на 49 %, на второй год – на 74 %. Под влиянием удобрения значительно ускорился также рост хвои. В 2018 г. ее длина на площадках с повышенным уровнем азотного питания составляла 57 мм, на площадках с естественным уровнем – 40 мм, в 2017 г. – 42 и 36 мм соответственно.

Вегетационный период 2019 г. По погодным условиям даже для северного региона оказался аномально холодным, особенно в начале и в середине, однако в общих чертах он повторял характер погоды летнего сезона 2018 г. Короткие редкие теплые периоды чередовались с продолжительными похолоданиями, нередко с выпадением обильных осадков. Поэтому в 2019 г., как и в 2018 г., сосна росла крайне неравномерно: нечастые и недолговременные ускорения роста молодых побегов сменялись длительным спадом интенсивности этого процесса. Как показали наблюдения за погодой, к 10 мая дневная температура воздуха в районе исследований кратковременно повысилась до 24–28 °С, ночная – до 12–14 °С, в почвенном слое 0–10 см – до 7,0 °С. К этому сроку снег на опытном участке полностью растаял, однако верховодка сохранялась. Затем после небольшого потепления, наступило длительное похолодание с дневными температурами воздуха 1–4 °С, выпадением снега и установлением временного снежного покрова. Такая погода стояла до конца месяца. В результате за период с 4 по 20 мая в контроле прирост верхушечных побегов составил 2,2 см, с 20 по 30 мая – 1,6 см, а с 30 мая по 9 июня – 4,1 см (рис. 3). Общая длина верхушечных побегов в 2019 г. в контроле была 11,9 см, в опыте – 19,9 см, а осевых побегов на первой боковой мутовке – 9,8 см, в опыте – 15,2 см (таблица).

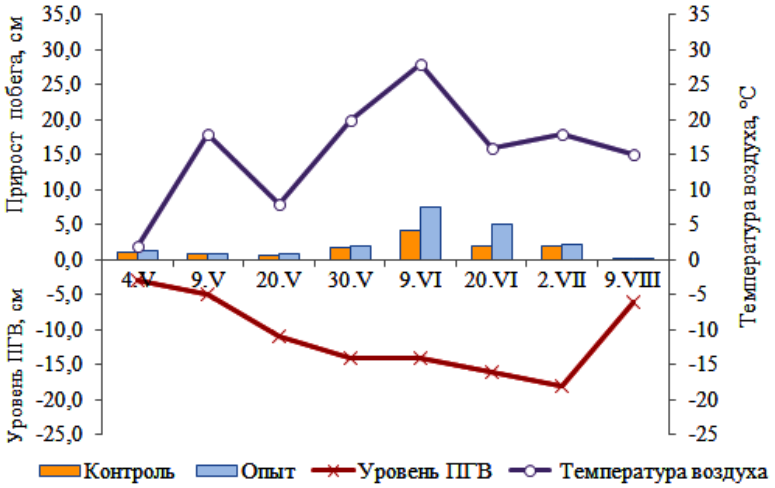


Рис. 3. Динамика сезонного прироста сосны в сосняке сфагновом при естественном и повышенном уровне азотного питания в 2019 г.

Fig. 3. Seasonal growth dynamics of pine in a sphagnum pine forest with a natural and increased level of nitrogen nutrition in 2019

Эффективное влияние азотного удобрения на рост молодых побегов сосны на третий год (2019) продолжилось. Действие вещества началось в мае после прихода теплой погоды. Уже к 30 числу отличие в длине верхушечных побегов удобренных деревьев и контроля достигло 1,0 см, к 9 июня оно возросло до 4,4 см, а к 20 июня – до 7,6 см. С повышением температуры разница между опытными деревьями и контролем увеличилась, а с понижением уменьшалась (рис. 3). В конце вегетационного периода молодые верхушечные побеги у опытных растений были на 7,6 см длиннее контрольных, на первой боковой мутовке – на 4,1 см.

Основной прирост побегов у сосны в 2019 г., как и в 2 предыдущих года, произошел в июне. За этот месяц прирост верхушечных побегов по отношению к общему приросту за год в контроле составил 59 %, на удобренных площадках – 65 %, осевых побегов на первой боковой мутовке – соответственно 93 и 94 % (таблица). В конце вегетации общая длина верхушечного побега в контроле была 11,9 см, в опыте – 19,6 см, осевого побега на первой боковой мутовке – 9,8 и 13,9 см, или по отношению к контролю в опыте она увеличилась на 64 и 48 % соответственно.

Таким образом, результаты опытов показали, что на избыточно увлажненных торфяных почвах северотаежной лесорастительной зоны скорость роста молодых побегов сосны определяется состоянием погодных условий и уровнем корневого питания. Связь межу ростом в высоту и УПГВ из-за неустойчивой с частыми осадками холодной погоды у сосны здесь носит условный характер, с коэффициентом корреляции $r = -0{,}37 \pm 0{,}12$.

Годичный прирост сосны в высоту в сосняке кустарничково-сфагновом оказался значительно ниже, чем в сухих лишайниковых сосняках Крайнего Севера [17]. Основной причиной плохого роста сосны в избыточно увлажненном сосняке кустарничково-сфагновом по сравнению с сосняком лишайниковым могли стать обусловленные анаэробиозом сбои в работе ее корневой системы и, возможно, в гормональном обмене [2, 7, 20, 21, 27, 28, 31, 32, 36, 37], а также недопоставка в растущие побеги ассимилятов из кроны из-за нарушения их нормального оттока и передвижения в дереве [4, 11–14].

Согласно результатам проведенного нами исследования, максимальный прирост сосны на Севере в заболоченных сосняках приходится на середину и конец июня, когда повышается температура воздуха и почвы, корни освобождаются от затопления, а интенсивный – чаще всего на 2–3-ю декады июня, когда продолжительность светового дня на Севере наибольшая. Затухание роста побегов в этих лесорастительных условиях не зависит от погоды и состояния почвы. В конце июня – начале июля, несмотря на благоприятные экологические условия, рост терминальных побегов постепенно прекращается, у сосны формируются апикальные и латеральные почки. Считается, что предельная календарная граница затухания роста терминальных побегов у данной древесной породы является генетическим свойством [17]. Однако в условиях Севера в отдельные годы, когда погодные условия сдвигают на более поздние сроки начало роста побегов, как это было в 2017 г., период прекращения их роста у сосны может продлиться до середины июля.

Несмотря на частое подтопление корневой системы, сосна в сосняках сфагновых положительно реагирует на дополнительное азотное питание путем увеличения прироста в высоту, но значительно в меньшей степени, чем это наблюдается у нее на сухих дренированных почвах сосняков лишайниковых [17]. В результате проведенных исследований выявлена достаточно тесная положительная корреляционная связь между уровнем азотного питания и ростом верхушечного побега сосны с коэффициентом корреляции (r) от 0,89±0,09 в первый год до 0,94±0,07 на второй год. Повышение дополнительного прироста побегов под влиянием удобрения происходило в те же отрезки времени, когда и на неудобренных площадках, и наоборот. О том, что в северных древостоях зависимость роста вегетативных органов сосны от погодных условий в полной мере сохраняется и при повышенном азотном питании, отмечали и другие исследователи [10]. Выявленные нами колебания в темпах прироста молодых побегов в основном были обусловлены изменениями температурного режима воздуха и почвы и в меньшей мере колебаниями УПГВ.

Сравнительно редкие (3–5 раз в мес.) определения интенсивности физиологических процессов у сосны в течение вегетационных периодов 2017–2019 гг. показывают, что наибольшие значения значения показателей этих процессов у прошлогодней хвои сосны наблюдаются в летний период. В мае–июле дыхание мелких корневых окончаний на контрольном участке было 0,50–1,49 мг, на участке с повышенным азотным питанием – 0,55…1,82 мг CO_2/(г·ч), интенсивность фотосинтеза – 11,0…20,4 мг и 12,3… ...24,3 мг CO_2/(г·ч), транспирации – 134…279 и 124…243 мг H_2O/(г·ч) соответственно. Максимальная интенсивность физиологических процессов наблюдалась в периоды, когда корни освобождались от затопления. Самая высокая интенсивность фотосинтеза и дыхания корней отмечалась у опытных растений, а транспирация – у контрольных. Результаты наших исследований и данные других авторов [11, 16, 21–23, 38] достаточно убедительно свидетельствуют, что острый дефицит азота и недостаток аэрации в заболоченных почвах Севера являются главными факторами, сдерживающими нормальное развитие и скорость роста сосны, влияющими на характер формирования у нее суточного и годичного прироста и на ее отдельные органы.

Заключение

Наблюдения за сезонным ростом сосны в высоту показали, что на заболоченных торфяных почвах северотаежной лесорастительной зоны прирост за год составляет 10,3–16,9 см. В сухих лишайниковых сосняках Крайнего Севера – 24,9–30,5 см, это в 2–2,5 раза больше, чем в сосняках сфагновых. Действие вносимого в последние азота в целом позитивное. В данных условиях под влиянием дозы N_{180} высота сосны ежегодно увеличивается на 7,7–8,5 см по сравнению с контролем. В первый год ее прирост больше на 50 %, во второй – на 74 %, в третий – на 64 %. На первой боковой мутовке осевой побег под действием азотного удобрения за год становится длиннее на 2,0–4,1 см, или на 15–42 % по сравнению с контролем. Увеличение прироста побегов у опытных растений происходило за счет азота, поглощенного из внесенного в насаждение удобрения. В сентябре 2019 г. содержание азота в прошлогодней хвое превышало контроль на 15 % (в контроле – 1,21 %, в опыте – 1,39 %). В профиле 5–10 см опытной почвы его содержание в этот период уравнялось с содержанием в контроле (2,07 %). В лишайниковых борах Крайнего Севера дополнительный прирост сосны в высоту под действием данной дозы азота составил от 5 см в первый год до 17 см на четвертый год, или по отношению к контролю в отдельные годы он увеличился на 19–66 %.

В сфагновых сосняках азотные удобрения у сосны на 8–10 дней сдвигают период затухания роста побегов и обуславливают более раннее (на 1-2 дня) начало их роста, связанное с укрупнением почек. Максимальный прирост побегов в этих условиях имеет место в середине и конце июня, когда корневая система сосны освобождается от затопления, а интенсивный – чаще во 2–3-ю декады июня, когда продолжительность дневного периода наибольшая.

Интенсивность фотосинтеза у сосны в сфагновом сосняке под влиянием азотного удобрения повышается по сравнению с контролем в первый год на 12 %, во второй – на 19 %. В данных условиях это необходимо дереву прежде всего для осуществления репарационных процессов в корнях, нуждающихся для своего проявления в притоке значительного количества пластических веществ. Повышение интенсивности фотосинтеза у растений после внесения в насаждения удобрений обуславливается стимулирующим действием азота на фиксацию CO_2 в хлоропластах, на морфогенез ассимиляционного аппарата и работу всех точек роста, на процессы листообразования. Максимальная интенсивность фотосинтеза и транспирации у сосны в заболоченных условиях проявляется на 2-й и 3-й год после внесения удобрений. Считаем, что для достижения у сосны в сфагновом сосняке оптимального ростового и физиологического эффекта, прежде всего, необходимо провести осушительные работы с помощью мелкой мелиорации, а затем через 2–3 года дополнительно внести 180 кг/га азота. Такие опыты с сосной и елью имеются в лесах Архангельской и Ленинградской областях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Атисков Н.В.* Сезонный рост побегов и хвои текущего года у сосны и лиственницы в Куйбышевском Заволжье // Лесоведение. 1978. № 5. С. 44–51.

Atiskov N.V. Seasonal Growth of Shoots and Needles of the Current Year in Pine and Larch in Kuybyshev Trans-Volga Region. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1978, no. 5, pp. 44–51.

2. *Бобкова К.С., Патов А.И.* Сезонная динамика роста побегов и корней // Эколого-биологические основы повышения продуктивности таежных лесов Европейского Севера. Л.: Наука, 1981. С. 93–103.

Bobkova K.S., Patov A.I. Seasonal Dynamics of Shoot and Root Growth. *Ecological and Biological Bases of Increasing Productivity of Taiga Forests of the European North*. Leningrad, Nauka Publ., 1981, pp. 93–103.

3. *Вальтер О.А., Пиневич Л.М., Варасова Н.Н.* Практикум по физиологии растений с основами биохимии. М.; Л.: Сельхозгиз, 1957. 341 с.

Wal'ter O.A., Pinevich L.M., Varasova N.N. *Workbook on Plant Physiology with the Basics of Biochemistry*. Moscow, Sel'khozgiz Publ., 1957. 341 p.

4. *Веретенников А.В., Кузьмин Ю.И.* Транспорт, распределение и потребление ^{14}C-ассимилятов у сосны обыкновенной при различном водном режиме торфяной почвы // Лесоведение. 1977. № 3. С. 34–41.

Veretennikov A.V., Kuz'min Yu.I. Transport, Distribution and Consumption of ^{14}C-Assimilates in Scots Pine under Different Water Regime of Peat Soil. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1977, no. 3, pp. 34–41.

5. *Вознесенский В.Л., Заленский О.В., Семихатова О.А.* Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений. М.; Л.: Наука, 1965. 305 с.

Voznesenskiy L.V., Zalenskiy O.V., Semikhatova O.A. *Methods of Studying Photosynthesis and Respiration of Plants*. Moscow, Nauka Publ., 1965. 305 p.

6. *Вомперский С.Э., Сабо Е.Д., Формин А.С.* Лесоосушительная мелиорация М.: Лесн. пром-сть, 1975. 296 с.

Vomperskiy S.E., Sabo E.D., Fomin A.S. *Forest Drainage Reclamation*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 296 p.

7. *Зарубина Л.В., Коновалов В.Н., Феклистов П.А., Клевцов Д.Н.* Динамика дыхания корней сосны и ели в северотаежных фитоценозах // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2014. № 2. С. 52–60.

Zarubina L.V., Konovalov V.N., Feklistov P.A., Klevtsov D.N. Dynamics of Root Respiration in Pine and Spruce Trees of Northern Taiga Plant Communities. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Estestvennyye nauki* [Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series "Natural Sciences"], 2014, no. 2, pp. 52–60.

8. *Иванов Л.А., Силина А.А., Цельникер Ю.Л.* О методе быстрого взвешивания для определения транспирации в естественных условиях // Ботан. журн. 1950. Т. 35, вып. 2. С. 171–185.

Ivanov L.A., Silina A.A., Tsel'niker Yu.L. On the Method of Fast Weighing to Determine Transpiration in Natural Conditions. *Botanicheskii Zhurnal*, 1950, vol. 35, iss. 2, pp. 171–185.

9. *Кищенко И.Т.* Сезонный рост хвои сосны в разных типах леса южной Карелии // Лесоведение. 1978. № 2. С. 27–32.

Kishchenko I.T. Seasonal Growth of Pine Needles in Different Forest Types of Southern Karelia. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1978, no. 2, pp. 27–32.

10. *Кищенко И.Т.* Сезонный рост сосны при внесении удобрений // Лесоведение. 1985. № 2. С. 73–78.

Kishchenko I.T. Seasonal Growth of Pine with Fertilizer Application. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1985, no. 2, pp. 73–78.

11. *Коновалов В.Н., Зарубина Л.В.* Эколого-физиологические особенности хвойных на осушаемых землях. Архангельск: САФУ, 2010. 295 с.

Konovalov V.N., Zarubina L.V. *Ecological and Physiological Features of Conifers on Drained Land*s. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 295 p.

12. *Коновалов В.Н., Зарубина Л.В.* Эколого-физиологические особенности хвойных на удобренных почвах. Архангельск: САФУ, 2011. 338 с.

Konovalov V.N., Zarubina L.V. *Ecological and Physiological Features of Conifers on Fertilized Soils*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2011. 338 p.

13. *Коновалов В.Н., Зарубина Л.В.* Влияние дозы азота при подкормках на отток ^{14}C-ассимилятов у сосны в сосняках лишайниковых // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 1. С. 7–13.

Konovalov V.N., Zarubina L.V. Impact of Nitrogen Dose on the ^{14}C-Assimilates Outflow in Pine Trees at the Lichen Pine Forests. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2012, no. 1, pp. 7–13. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b50/xnxx1.pdf

14. *Коновалов В.Н., Листов А.А.* Влияние условий минерального питания на дыхание корней сосны обыкновенной // Изв. вузов. Лесн. журн. 1989. № 4. С. 15–19.

Konovalov V.N., Listov A.A. Influence of Mineral Nutrition Conditions on Respiration of Scots Pine Roots. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1989, no. 4, pp. 15–19. URL: http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1989/Lesnoy_zhurnal_1989_god_4_chast.pdf

15. *Коновалов В.Н., Листов А.А.* Сезонный рост и фотосинтез сосны обыкновенной под влиянием азотных удобрений // Повышение продуктивности лесов Европейского Севера: сб. науч. тр. Архангельск: АИЛиЛХ, 1992. С. 151–159.

Konovalov V.N., Listov A.A. Seasonal Growth and Photosynthesis of Scots Pine under the Influence of Nitrogen Fertilizers. *Increasing the Forest Productivity in the European North: Collection of Academic Papers*. Arkhangelsk, AILiLH Publ., 1992, pp. 151–159.

16. *Лир Х., Польстер Г., Фидлер Г.-И.* Физиология древесных растений. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 424 с.

Lir H., Pol'ster G., Fidler G.I. *Physiology of Woody Plants*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. 424 p.

17. *Листов А.А., Коновалов В.Н.* Влияние минеральных удобрений на сезонный рост сосны в высоту // Лесоведение. 1988. № 1. С. 33–42.

Listov A.A., Konovalov V.N. Influence of Mineral Fertilizers on Seasonal Growth of Pine Trees in Height. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1988, no. 1, pp. 33–42.

18. *Мамаев В.В.* Суточные изменения интенсивности выделения CO_2 у корневых мочек сосны и березы в природных условиях // Лесоведение. 1983. № 3. С. 33–38.

Mamayev V.V. Daily Changes in the Intensity of CO_2 Emission in the Root Fibrilla of Pine and Birch under Natural Conditions. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1983, no. 3, pp. 33–38.

19. *Медведева В.М.* Формирование лесов на осушенных землях среднетаежной подзоны. Петрозаводск: Карелия, 1989. 168 с.

Medvedeva V.M. *Formation of Forests on the Drained Lands of the Middle Taiga Zone*. Petrozavodsk, Kareliya Publ., 1989. 168 p.

20. *Меняйло Л.Н.* Гормональная регуляция ксилогенеза хвойных. Новосибирск: Наука, 1987. 185 с.

Menyaylo L.N. *Hormonal Regulation of Conifer Xylogenesis*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 185 p.

21. *Орлов А.Я., Кошельков С.П.* Почвенная экология сосны. М.: Наука, 1971. 323 с.

Orlov A.Ya., Koshel'kov S.P. *Soil Ecology of Pine Trees*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 323 p.

22. *Паавилайнен Э.* Применение минеральных удобрений в лесу: пер. с фин. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 96 с.

Paavilaynen E. Application of Mineral Fertilizers in the Forest. Trans. from Finnish. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 96 p.

23. *Победов В.С.* Исследование и обоснование применения минеральных удобрений в интенсивном лесном хозяйстве (на примере Белорусской ССР): автореф. дис. … д-ра с.-х. наук. М.: МЛТИ, 1981. 38 с.

Pobedov V.S. *Studying and Substantiating the Use of Mineral Fertilizers in Intensive Forestry (Case Study of the Belorussian SSR)*: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs. Moscow, MLTI, 1981. 38 p.

24. *Поргасаар В.И.* Минеральное питание сосны обыкновенной и его диагностика. автореф. дис. … канд. биол. наук. Тарту, 1973. 42 с.

Porgasaar V.I. *Mineral Nutrition of Scots Pine and Its Diagnosis*: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs. Tartu, 1973. 42 p.

25. *Ратнер Е.И.* Питание растений и применение удобрений. М.: Наука, 1965. 223 с.

Ratner E.I. *Plant Nutrition and Fertilizer Application*. Moscow, Nauka Publ., 1965. 223 p.

26. *Тараканов А.М.* Рост осушаемых лесов и ведение хозяйства в них. Архангельск: СевНИИЛХ, 2004. 228 с.

TarakanovA.M. *Growth of Drained Forests and Management in Them*. Arkhangelsk, SevNIILH Publ., 2004. 228 p.

27. *Федорова А.И., Зражевская Г.К.* Фитогормоны у карликовых и нормальных форм сосны обыкновенной // Лесоведение. 1983. № 3. С. 39–46.

Fedorova A.I., Zrazhevskaya G.K. Phytohormones in Dwarf and Normal Forms of Scots Pine. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 1983, no. 3, pp. 39–46.

28. *Цельникер Ю.Л.* Дыхание корней и его роль в углеродном балансе древостоя // Лесоведение. 2005. № 6. С. 11–18.

Tsel'niker Yu.L. Root Respiration and Its Role in the Carbon Balance of a Stand. *Lesovedenie* [Russian Journal of Forest Science], 2005, no. 6, pp. 11–18.

29. *Цветков В.Ф., Семенов Б.А.* Сосняки Крайнего Севера. М.: Агропромиздат, 1985. 116 с.

Tsvetkov V.F., Semenov B.A. *Pine Forests of the Far North*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 116 p.

30. *Чернобровкина Н.П.* Экофизиологическая характеристика использования азота сосной обыкновенной. СПб.: Наука, 2001. 175 с.

Chernobrovkina N.P. *Ecophysiological Characteristics of Nitrogen Use by Scots Pine*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2001. 175 p.

31. Chen C.-M., Ertl J.R., Leisner S.M., Chang C.-C. Localization of Cytokinin Biosynithesis Sites in Plants and Carrot Roots. *Plant Physiology*, 1985, vol. 78, iss. 3, pp. 510–513. DOI: https://doi.org/10.1104/pp.78.3.510

32. Goutts M.P. Effects of Waterlogging on Water Relations of Actively-Growing and Dormant Sitka Spruce Seedlings. *Annals of Botany*, 1981, vol. 47, iss. 6, pp. 747–753. DOI: https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086073

33. Granato T.C., Raper Jr. C.D., Wilkerson G.G. Respiration Rate in Maize Roots Is Related to Concentration of Reduced Nitrogen and Proliferation of Lateral Roots. *Physiologia Plantarum*, 1989, vol. 76, iss. 3, pp. 419–424. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1989.tb06213.x

34. Heinze M., Fiedler H.J. Water Consumption, Nutrition and Growth of Pine Seedlings under the Conditions of Different Radiation Intensity, Watering and Fertilization. *Flora*, 1980, vol. 169, iss. 1, pp. 89–103. DOI: https://doi.org/10.1016/S0367-2530(17)31167-2

35. Kaczmarck D.J., Pope P.E. The Relationship between Soil Nutrient Availability and Foliar Nitrogen and Phosphorus Concentrations in Hardwoods. *Annual Meeting of the American Society of Agronomy 1993*. Cincinnati, 1993, p. 336.

36. Mannerkoski H., Miyazawa T. Growth Disturbances and Needle and Soil Nutrient Contents in a NPK-Fertilized Scots Pine Plantation on a Drained Small-Sedge Bog. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, 1983, no. 116, pp. 85–91.

37. Mazumder A.H., White E.H., Bickelhaupt D.H. Foliar Response of Northern Hardwood Stands to Fertilization. *Annual Meeting of the American Society of Agronomy 1993*. Cincinnati, 1993, p. 338.

38. Michniewicz M., Stopinska J. The Effect of Nitrogen Nutrition on Growth and on Plant Hormones Content in Scots Pine (*Pinus silvestris* L.) Seedlings Grown under Light of Different Intensity. *Acta Sociatatis Botanicorum Poloniae*, 1980, vol. 45, no. 3, pp. 221–234. DOI: https://doi.org/10.5586/asbp.1980.020

39. Palta J.A., Nobel P.S. Influence of Soil O_2 and CO_2 on Root Respiration for *Agave deserti*. *Physiologia Plantarum*, 1989, vol. 76, iss. 2, pp. 187–192. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1989.tb05630.x

SEASONAL GROWTH OF SCOTS PINE UNDER THE CONDITIONS OF WATER-LOGGED SOILS OF THE NORTH

Liliya V. Zarubina, *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: AAG-8579-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3834-0521*
Renat S. Khamitov, *Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: Z-1461-2018, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1490-3553*
Vologda State Diary Farming Academy named after N.V. Vereshchagin, ul. Schmidta, 2, Molochnoe, Vologda, 160555, Russian Federation; e-mail: Liliya270975@yandex.ru

Abstract. The seasonal rhythm of height growth of young shoots of Scots pine growing in a 33-year-old shrubby-sphagnum pine forest of the northern taiga natural-climatic zone has been studied in a complex with the main physiological processes. The possibility of regulating their intensity by additional introduction of nitrogen fertilizer has been determined. It has been found that on hydromorphic excessively wet soils of the North, seasonal height growth of pine occurs with a maximum rate in late June and early July, when air temperature rises and the root system is released from excessive moisture. Unlike lichen pine forests, in which pine roots are not affected by flooding, on hydromorphic peat soils pine grows much slower and during the growing season has less intensive physiological processes. The low rate of shoot growth and physiological processes in pine in sphagnum forest site conditions is explained by dysfunction of its root system as a result of soil anoxia caused by flooding, as well as by insufficient supply of growing shoots with macronutrients from the crown as a result of violation of their normal outflow and movement in the tree. Nitrogen fertilizers positively affect growth and physiological processes in pine trees in sphagnum forest types. However, their effect in these forest site conditions is much weaker than in the dry lichen forests of the Far North. On water-logged peat soils under the influence of nitrogen fertilizer seasonal height growth of pine trees increases by 20 %, the duration of seasonal shoot growth increases by 8–10 days, the intensity of photosynthesis increases significantly, and, as a result of reduced water consumption for transpiration, the tree water regime normalizes and the transpiration productivity increases. These positive nitrogen-induced changes ultimately improve the viability and productivity of sphagnum pine forests.
For citation: Zarubina L.V., Khamitov R.S. Seasonal Growth of Scots Pine under the Conditions of Water-Logged Soils of the North. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 86–100. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-86-100

Keywords: Scots pine, sphagnum pine forest, soil moisture, nitrogen fertilizer, physiological processes, seasonal shoot growth.

Поступила 09.01.20 / Received on January 9, 2020

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630*372/375
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФОРВАРДЕРОВ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОЧВОГРУНТЫ

О.Н. Бурмистрова[1], д-р техн. наук, проф.;
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2616-7557
А.А. Просужих[1], ст. преп.; *ResearcherID: AAJ-2312-2020,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1968-3713
Е.Г. Хитров[2], канд. техн. наук; *ResearcherID: R-8199-2016,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4569-9508
О.А. Куницкая[3], д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: AAC-9568-2020,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8542-9380
Е.Н. Лунева[4], канд. с.-х. наук, доц.; *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4363-5746*
[1]Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, д. 13, г. Ухта, Республика Коми, Россия, 169300; e-mail: olga.burm@mail.ru
[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251; e-mail: yegorkhitrov@gmail.com
[3] Арктический государственный агротехнологический университет, 3-й км, д. 3, ш. Сергеляхское, г. Якутск, Республика Якутия, Россия, 677007; e-mail: ola.ola07@mail.ru
[4] Донской государственный аграрный университет, ул. Кривошлыкова, д. 24, пос. Персиановский, Октябрьский район, Ростовская область, Россия, 346493;
e-mail: hizz90@yandex.ru

Аннотация. Колесные лесные машины в настоящее время доминируют в лесозаготовительном производстве в России и в мире. Ежегодно в нашей стране увеличивается доля машинной заготовки древесины по скандинавской технологии, предусматривающей выполнение валки деревьев, их очистки от сучьев и раскряжевки прямо на пасеке. Так работают не только классические двухмашинные комплексы, состоящие из харвестера и форвардера, но и трехмашинные (в ряде регионов Сибири), включающие валочно-пакетирующий агрегат, работающий на пасеке процессор и форвардер для трелевки получаемых сотиментов. Проблема повышения эффективности работы форвардеров актуальна для лесопромышленного комплекса. Ее решение возможно на основе оценки проектных решений с использованием современных средств моделирования и оптимизации процессов на стадии разработки. Такой подход требует глубоких теоретических и экспериментальных исследований, представляет большой научный и практический интерес. При определении максимального объема трелюемой древесины учитывают следующие ограничения машины: по грузоподъемности; по касательной силе тяги; по сцеплению движителя с грунтом (касательная сила тяги не должна превышать силу сцепления движителя с поверхностью движения – почвогрунтом лесосеки). Кроме того, известны рекомендации по ограничению веса трелевочной машины с грузом исходя из допустимой глубины колеи после первого прохода машины, считается, что этот показатель не должен превышать 20 см. Данное утверждение подкрепляется

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

результатами исследований развития колеи при циклическом воздействии со стороны колесного движителя (т. е. при многократном прохождении машиной одного и того же участка волока). В этой связи возникает вопрос о производительности форвардеров при выполнении операции трелевки с учетом ограничения по глубине колеи.
Для цитирования: Бурмистрова О.Н., Просужих А.А., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Лунева Е.Н. Теоретические исследования производительности форвардеров при ограничениях воздействия на почвогрунты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 101–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116

Ключевые слова: лесозаготовка, производительность форвардеров, трелевочная система, почвогрунты.

Введение

В настоящее время подавляющий объем заготовленной древесины в России вытрелевывается на погрузочные пункты форвардерами, практически 100 % которых имеют колесный движитель. На их производительность первоочередное влияние оказывают расстояние трелевки и проходимость, зависящая от состояния поверхности движения [4, 5]. Производительность лесных машин зависит от множества факторов, относящихся к природным и производственным условиям [3, 6–9, 11]. Их изменчивость и вариативность во многом определяют сложность теоретической оценки показателей работы машин [21, 23–25, 27]. На территории лесного фонда Российской Федерации преобладают почвогрунты III и IV категории, которые в теплый период года существенно теряют несущую способность из-за переувлаженения [1]. Причем за последние годы процессы потепления климата привели к значительному уменьшению периода, когда почвогрунты находятся в замерзшем состоянии и зимняя вывозка заготовленной древесины устойчива, а значит, и период эффективной трелевки стал короче. При обосновании режимов и показателей работы форвардеров необходимо учитывать и негативные экологические факторы их работы, которые выражаются в замедлении лесовосстановительных процессов, проявлении признаков водной эрозии на трелевочных волоках, угнетении корней, замедлении роста, ослаблении оставляемых на доращивание деревьев вблизи трасс движения. В настоящее время ведущие позиции в исследуемом вопросе занимает научная школа «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета.

Подробный расчет составляющих затрат времени на цикл трелевки не всегда целесообразен. Например, затраты времени, связанные с работой манипулятора, будут зависеть как от скорости манипулятора, так и от действий оператора и пространственного расположения лесоматериалов [5, 7]. По этим причинам будем ориентироваться на вероятностный подход и имитационное моделирование при расчете производительности форвардера. Логически разделим исследование на этапы:

формулирование в общем виде математической модели для прогнозирования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта;

выделение основных составляющих затрат времени на выполнение отдельных операций цикла трелевки;

аналитическое определение допустимых режимов работы форвардера (скорость, объем трелюемой древесины), исходя из эксплуатационных характеристик и почвенно-грунтовых условий;

прогнозирование общего вида регрессионных зависимостей, объясняющих с достаточной точностью влияние основных факторов на затраты времени по отдельным операциям, и доверительных границ варьирования коэффициентов регрессионных зависимостей;

реализация математической модели с подстановкой значений коэффициентов уравнений регрессии в пределах установленных доверительных границ варьирования (имитационный подход).

Цель исследования заключается в разработке математической модели для прогнозирования производительности форвардера с учетом его эксплуатационных характеристик, параметров лесосеки и физико-механических свойств почвогрунта, аналитическом определении допустимых режимов работы форвардера и общего вида регрессионных зависимостей, объясняющих с достаточной точностью влияние основных факторов на затраты времени по отдельным операциям.

Объекты и методы исследования

Часовую производительность форвардера определим по формуле [7]:

$$\Pi = \frac{3600V}{T}, \quad (1)$$

где V – объем трелюемых лесоматериалов; T – время цикла трелевки.

Объем трелюемых лесоматериалов ограничен грузоподъемностью форвардера:

$$V \le \frac{L}{\rho}, \quad (2)$$

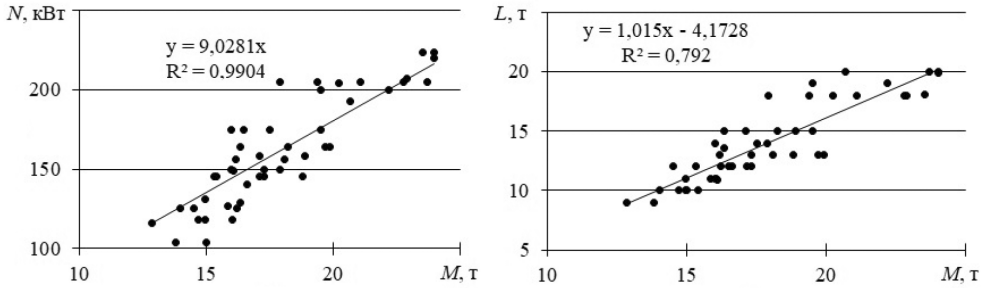
где L – грузоподъемность форвардера; ρ – среднее значение плотности трелюемой древесины,

а также нагрузкой со стороны движителя на грунт [2, 10, 14, 26, 28].

Анализ данных, предоставленных производителями форвардеров Ponsse, John Deere, Komatsu и др., показывает, что грузоподъемность машины связана с ее массой соотношением (рис. 1):

$$L = a_0 + a_1 - 4{,}1728 + 1{,}015M, \quad (3)$$

где M – масса форвардера.



а *б*

Рис. 1. Зависимость грузоподъемности (*а*) и мощности двигателя (*б*) форвардера от его массы

Fig. 1. Dependence of bearing capacity (*a*) and engine power (*б*) of a forwarder on its weight

Кроме того, существует связь мощности двигателя и массы машины (рис. 1, *б*):

$$N = b_1 M = 9{,}0281 M. \tag{4}$$

Результаты анализа статистических данных также представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты анализа статистических данных о связи массы форвардера, его грузоподъемности и мощности двигателя

Коэффициент	Оценка	Стандартная ошибка	*t*-критерий
a_0	–4,17277	1,4088700	–2,96178
a_1	1,01501	0,0775335	13,09120
b_1	9,02810	0,1307430	69,05230

Стандартные ошибки определения коэффициентов уравнений (3), (4) будут использованы при реализации разрабатываемой математической модели, предназначенной для прогнозирования производительности форвардерной трелевки.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из ограничения (2):

$$P \le P_{adm}; \tag{5}$$

$$\frac{G_0 + G}{2k} \le P_{adm}; \tag{6}$$

$$\frac{g\left(M + \rho V\right)}{2k} \le P_{adm}; \tag{7}$$

$$V \le \frac{2kP_{adm} - Mg}{\rho g}, \tag{8}$$

где P и P_{adm} – нагрузка и допустимая нагрузка на грунт со стороны движителя; G_0 – вес форвардера; G – вес трелюемых лесоматериалов; k – число осей форвардера; g – ускорение свободного падения.

Таким образом, объем трелюемых лесоматериалов определим по условию

$$V = \min\left\{\frac{L}{\rho}; \frac{2kP_{adm} - Mg}{\rho g}\right\}. \tag{9}$$

Допустимая нагрузка на грунт P_{adm} зависит от свойств почвогрунта и будет исследована в дальнейшем.

Время цикла трелевки найдем по формуле [22]:

$$T = \varphi_0\left[l_{\text{п.в}}\left(\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2}\right) + l_{\text{м.в}}\left(\frac{1}{v_3} + \frac{1}{v_4}\right) + t_{\text{загр}} + t_{\text{разгр}}\right], \tag{10}$$

где φ_0 – поправочный коэффициент, учитывающий увеличение времени цикла трелевки в связи с простоями машины; $l_{\text{п.в}}$ – длина пасечного волока (среднее значение); $l_{\text{м.в}}$ – длина магистрального волока (среднее значение); v_1, v_2 – скорость порожнего и груженого форвардера при движении по пасечному волоку; v_3, v_4 – скорость порожнего и груженого форвардера при движении по маги-

стральному волоку; $t_{загр}$ – время загрузки сортиментов в кузов; $t_{разгр}$ – время разгрузки кузова.

Скорости v_i ограничены как соотношением мощности двигателя форвардера N и силы сопротивления движению машины, так и технологическими соображениями, связанными с безопасностью маневрирования машины в условиях бездорожья. Ограничение по мощности двигателя запишем так [15]:

$$v_i = \frac{N\eta}{F_i}, \tag{11}$$

где η – КПД трансмиссии, F_i – сила сопротивления движению на i-м участке.

Следовательно, для форвардера

$$v_i = \min\left\{\frac{N\eta}{F_i}; v_{i,техн}\right\}. \tag{12}$$

Согласно экспериментальным данным [20], время загрузки кузова складывается из двух основных составляющих:

$$t_{загр} = t_{загр1} + t_{загр2}, \tag{13}$$

где $t_{загр1}$ – время, затрачиваемое на работу манипулятора форвардера при загрузке кузова; $t_{загр2}$ – время, затрачиваемое на маневры форвардера при загрузке кузова, причем [7]:

$$t_{загр1} = t_{загр1}(V, n); \tag{14}$$

$$t_{загр2} = t_{загр2}(V, q), \tag{15}$$

n – число сортиментов, укладываемых в кузов; q – запас древесины на единицу площади лесосеки.

Число сортиментов, укладываемых в кузов, будет являться функцией объема лесоматериалов, трелюемых за рейс, а также среднего объема сортимента [7]:

$$n = n(V, V_{сорт}), \tag{16}$$

где средний объем сортимента $V_{сорт}$ связан со средним объемом хлыста и типом заготавливаемых лесоматериалов:

$$V_{сорт} = V_{сорт}(V_x), \tag{17}$$

V_x – средний объем хлыста.

Время разгрузки кузова также можно представить как сумму двух основных составляющих:

$$t_{разгр} = t_{разгр1} + t_{разгр2}, \tag{18}$$

где $t_{разгр1}$ – время, затрачиваемое на работу манипулятора форвардера при разгрузке кузова; $t_{разгр2}$ – время, затрачиваемое на маневры форвардера при разгрузке кузова, причем:

$$t_{разгр1} = t_{разгр1}(V, n); \tag{19}$$

$$t_{разгр2} = t_{разгр2}(V). \tag{20}$$

Параметры M, q, ρ, V_x, $l_{п.в}$, $l_{м.в}$ в разрабатываемой модели будут являться управляемыми. Значение V определим аналитически на основе (9) с учетом L и физико-механических свойств почвогрунта; скорости v_i по (12) оценим при помощи аналитического выражения для F_i и N. Вид функции (15)–(17), (20), оценки и стандартные ошибки определения коэффициентов найдем с использовани-

ем экспериментальных данных. В результате получим имитационную модель, прогнозирующую производительность форвардерной трелевки в зависимости от эксплуатационных характеристик машины и природно-производственных условий.

При исследовании показателей взаимодействия движителей машин с почвогрунтами успешно применяется подход, основанный на использовании различных моделей вдавливания штампов-инденторов в деформируемую среду. Например, известны работы, в которых рассматривается сжатие элементарных слоев упругого полупространства штампом определенной формы [12, 13, 16, 18]. Расхождение теоретических оценок с практикой, вызванное допущением об упругости деформируемого почвогрунта, устраняется за счет введения в модели поправочных коэффициентов, учитывающих потерю им несущей способности [17]. Подобный подход стал значимым для исследования опорной проходимости и экологичности лесных машин [2, 10], однако до недавнего времени в рамках него практически не рассматривались вопросы, связанные с моделированием поворота машин. Реализация метода, использующего нелинейные уравнения, не имеющие аналитических решений, требует дальнейших вычислительных экспериментов.

Также напряжения и деформации почвогрунта под воздействием движителя машины могут рассматриваться на основе решения задачи Буссинеска о вдавливании сферического индентора в упругое полупространство [2, 10, 15, 17, 19]. Этот подход успешно использован при моделировании уплотнения почвогрунтов лесосек как непосредственно под движителем, так и в боковых полосах трелевочных волоков [15]. Здесь применяются аналитические решения теории упругости, учет потери несущей способности возможен посредством замены пределов прочности при сжатии пределами прочности почвогрунта при сдвиге. Учтем эти теоретические положения при разработке нашей модели. Сформулируем базовые уравнения для расчета напряжений в почвогрунте. Моделью движителя является сферический штамп (рис. 2).

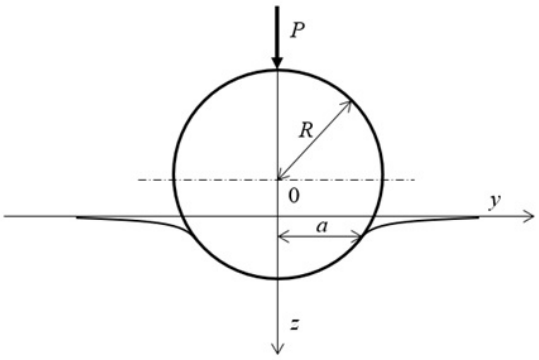


Рис. 2. Схема к решению задачи Буссинеска о вдавливании сферического штампа в полупространство

Fig. 2. Scheme for solving the Boussinesq problem of pressing a spherical die into a half-space

В этом случае напряжения по осям z, y удобно выразить функциями [20]:

$$\sigma_z = q_a \psi_z ; \quad (21)$$

$$\sigma_y = q_a \psi_y ; \quad (22)$$

$$\tau_{yz} = q_a \psi_{yz} ; \quad (23)$$

где q_a – среднее давление по плоскости контакта [2],

$$q_a = \frac{P}{\pi a^2}, \tag{24}$$

P – сила, прикладываемая со стороны штампа; a – радиус пятна контакта (рис. 2).

Значение a находим по [10]:

$$a = \left[\frac{3PR(1-\mu)^2}{4E}\right]^{\frac{1}{3}}, \tag{25}$$

где R – радиус штампа (приблизительно равен радиусу колеса); μ – коэффициент Пуассона почвогрунта; E – модуль упругости почвогрунта.

Точные выражения для функций ψ приводятся в [20]:

$$\psi_z = -\left(\frac{z}{\sqrt{u}}\right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2}; \tag{26}$$

$$\psi_y = \frac{1-2\mu}{3}\frac{a^2}{r^2}\left[1-\left(\frac{z}{\sqrt{u}}\right)^3\right] + \left(\frac{z}{\sqrt{u}}\right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2} +$$

$$+\frac{z}{\sqrt{u}}\left[\frac{(1-\mu)u}{a^2+u} + (1+\mu)\frac{\sqrt{u}}{a}\operatorname{arctg}\frac{a}{\sqrt{u}} - 2\right]; \tag{27}$$

$$\psi_{yz} = -\frac{(r^2+z^2)z^2}{u^2+a^2z^2}\,\frac{a^2\sqrt{u}}{a^2+u}, \tag{28}$$

где z – вертикальная координата; u, r – геометрические параметры, определяемые соответственно по [14] и [20],

$$u = -\frac{a^2}{2} + \frac{r^2}{2} + \frac{z^2}{2} + \frac{\sqrt{a^4 - 2a^2r^2 + 2a^2z^2 + r^4 + 2r^2z^2 + z^4}}{2}; \tag{29}$$

$$r = \sqrt{z^2 + y^2}, \tag{30}$$

где y – горизонтальная координата (рис. 2).

Дополнительное касательное напряжение, вызываемое поворотом движителя, определим по формуле [2]:

$$\tau_\theta = \frac{(\sigma_z - \sigma_y)\,\sin 2\theta}{2}, \tag{31}$$

где θ – угол поворота движителя.

Тогда суммарное касательное напряжение можем найти по уравнению [10]:

$$\tau_s = \tau_\theta + \tau_{yz}. \tag{32}$$

Анализ зависимостей (21)–(32) показывает, что они включают в себя параметры грунта E, μ и движителя R, θ, P, причем напряжения σ, τ можно определить для точек с произвольными координатами z, r (либо y). Таким образом, сопоставляя напряжения σ, τ с пределами прочности почвогрунта, установим глубину залегания «опасных» сечений массива почвогрунта, по которой оценим глубину колеи h, в том числе с учетом поворота движителя на угол θ. Сечения можем найти как решения уравнений:

$$\sigma_z = p_z\,, \tag{33}$$

$$\tau_s = \tau_{adm}\,, \tag{34}$$

где p_z – несущая способность лесного грунта; τ_{adm} – предел прочности лесного грунта на срез, рассчитывается по формуле [15]:

$$\tau_{adm} = \sigma_z \operatorname{tg}\varphi + C\left(1 - \frac{SR}{t_{gr}}\right), \tag{35}$$

φ – угол внутреннего трения лесного почвогрунта; C – удельное сцепление лесного почвогрунта; S – коэффициент технического буксования движителя; t_{gr} – шаг грунтозацепов; множитель $1-\frac{SR}{t_{gr}}$ вводится с целью учесть ослабление почвогрунта на срез, вызываемое сдвиговой деформацией.

Далее по зависимости $P(h)$ определим силу сопротивления прямолинейному движению и повороту движителя.

Физико-механические свойства лесного грунта примем в соответствии с табл. 2 [15].

Таблица 2

Физико-механические свойства лесного почвогрунта [15]

Категория лесного грунта	E, МПа	μ	p_z, МПа	C, МПа	φ,…°
III (слабый)	0,4	0,15	0,0504	0,005	11
II (средней прочности)	1,0	0,25	0,1170	0,012	15
I (прочный)	3,0	0,35	0,2870	0,024	16

Приведем численные примеры расчета по представленным зависимостям. Здесь и далее, если не отмечено отдельно, иллюстрации выполнены для результатов расчетов при R = 1,333/2 м, P = 0,045 МН, S = 0,05, t_{gr} = 0,14 м, лесной почвогрунт II категории.

На рис. 3 приведены графики для трех функций напряжений по выражениям (26)–(28) при $y \to 0$.

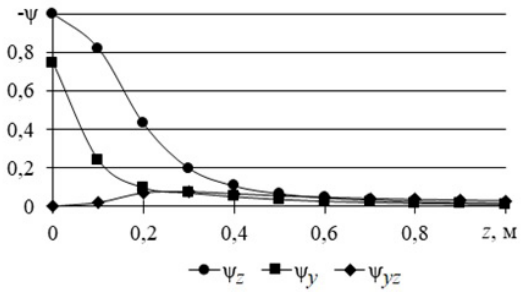


Рис. 3. Функции для расчета напряжений в массиве почвогрунта

Fig. 3. Functions for calculating stresses in a soil mass

Анализ графиков показывает, что нормальное сжимающее напряжение по оси z превышает сжимающее напряжение по оси y. Оба нормальных напряжения выше касательного τ_{zy}.

В данном случае $\sigma_z > \sigma_y$ и при иных значениях координаты y, что подтверждается расчетами и графиками, представленными на рис. 4, 5.

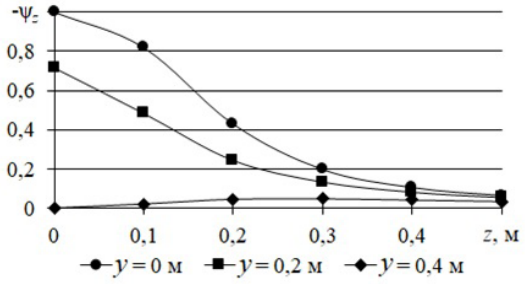


Рис. 4. Функция для расчета нормального напряжения в массиве почвогрунта по оси z (воздействие движителя на грунт по вертикали)

Fig. 4. Function for calculating the normal stress in the soil mass along the z-axis (vertical impact of the mover on the soil)

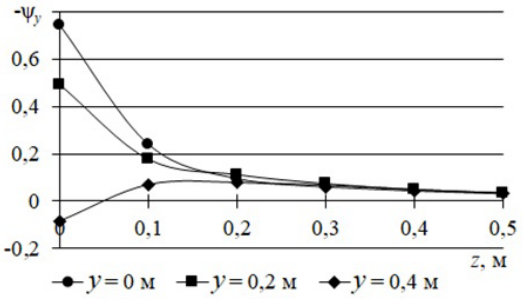


Рис 5. Функция для расчета нормального напряжения в массиве почвогрунта по оси y (боковое воздействие движителя на грунт)

Fig. 5. Function for calculating the normal stress in the soil mass along the y-axis (lateral impact of the mover on the soil)

При сравнительно небольших значениях $z < 0{,}05$ м напряжение σ_y может становиться растягивающим при $y > 0{,}2$ м, однако его значение по абсолютной величине практически на порядок ниже абсолютного значения напряжения σ_z под штампом. Сравнительно небольшая глубина залегания слоев почвогрунта, в которых возникает растягивающее напряжение по нормали, позволяет пренебречь им при расчете глубины колеи.

На рис. 6 представлены функции к расчету распределения касательного напряжения τ_{yz}.

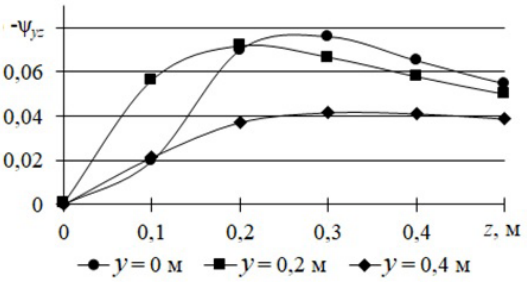


Рис. 6. Функция для расчета касательного напряжения в массиве почвогрунта по нормали к вертикальной оси z (без учета поворота движителя)

Fig. 6. Function for calculating the tangential stress in the soil mass along the normal to the vertical z-axis (regardless of mover rotation)

Обратим внимание, что для абсолютного значения касательного напряжения характерны точки максимума, причем на глубине большей, чем глубина залегания слоев грунта, в которых возникает растягивающее нормальное напряжение σ_y. Это подтверждает сделанное выше допущение о сравнительно малом влиянии растягивающего напряжения на формирование колеи.

Сопоставим расчетные значения напряжений σ_z, τ_s с пределами прочности p_z и τ_{adm}. На рис. 7 представлены графики, иллюстрирующие распространение напряжений при $\theta = 5^{\circ}$.

Как следует из расчетов, в данном случае сжимающее напряжение σ_z сравняется с несущей способностью грунта p_z при $z \approx 0{,}15$ м и глубина колеи h_0, образовавшейся под воздействием нормальной нагрузки, составит примерно 0,15 м. При этом касательное напряжение τ_s превысит предел прочности τ_{adm} при

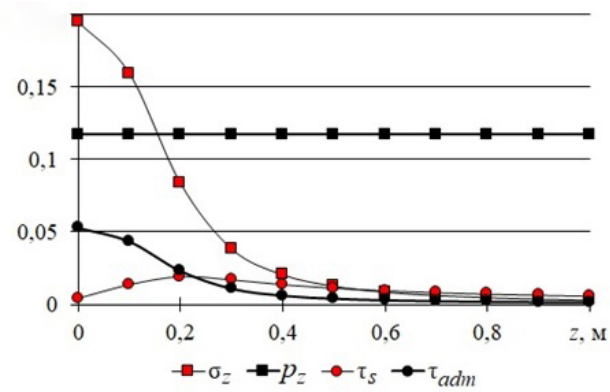


Рис. 7. Распространение напряжений, МПа, в лесном грунте при повороте движителя на угол θ = 5º

Fig. 7. Propagation of stresses in the forest soil when the mover is rotated by an angle of θ = 5°

$z \approx 0{,}22$ м, что приведет к разрушению грунтового массива за счет среза, следовательно, фактическая глубина колеи h составит не менее 0,22 м.

Обработка аналитических данных, полученных при варьировании свойств лесного грунта в пределах, указанных в табл. 2, в широком диапазоне изменения нагрузки P (0,025…0,055 МН) показывает, что для случая воздействия форвардера на лесной грунт можно предложить функцию, с высокой точностью аппроксимирующую итоги расчетов:

$$h_0 = 1{,}27\left(\frac{P}{E}\right)^{\frac{2}{3}}, \tag{36}$$

где P = 0,025–0,055 МН; E = 0,4–3,0 МПа.

На рис. 8 представлены результаты вычисления фактической глубины колеи с учетом варьирования угла поворота движителя форвардера.

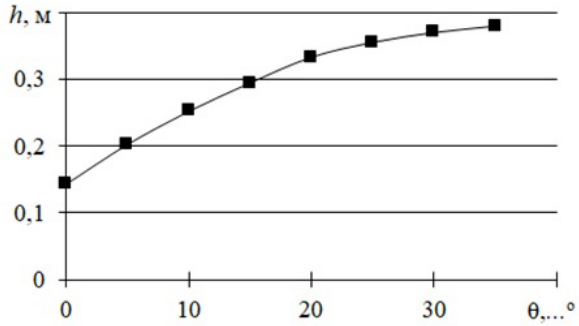


Рис. 8. Результаты расчета глубины колеи при варьировании угла поворота движителя

Fig. 8. Results of calculating the track depth when varying the angle of rotation of the mover

Анализ полученных данных показывает (рис. 9), что соотношение глубины колеи h при определенном угле θ и глубины колеи без учета поворота движителя практически функционально точно описывается полиномом:

$$k_\theta = 1 + 0{,}0899\theta - 0{,}0012\theta^2. \tag{37}$$

Таким образом, на основе формул (36), (37) получим многопараметрическую функцию для оценки глубины колеи с учетом маневрирования форвардера:

$$h = 1{,}27\left(\frac{P}{E}\right)^{\frac{2}{3}}\left(1 + 0{,}0899\theta - 0{,}0012\theta^2\right). \tag{38}$$

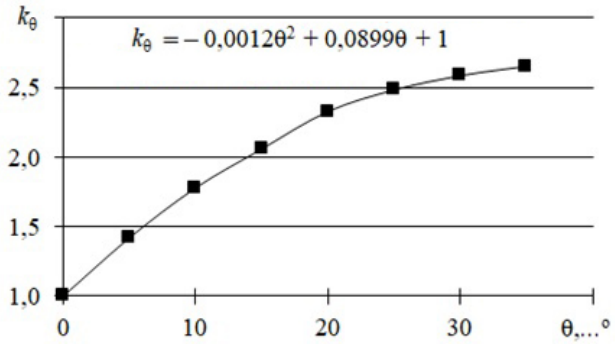


Рис. 9. Соотношение глубины колеи с учетом угла поворота движителя и глубины колеи при прямолинейном движении

Fig. 9. The ratio of the track depth, taking into account the angle of rotation of the mover and the track depth in straight-line motion

Сформулируем рекомендации по подбору допустимой нагрузки на колесо форвардера при ограничении глубины колеи. Примем h_{adm} = 0,2 м, тогда на основе формулы (38) вычислим значения P, при которых глубина колеи не превысит максимальную величину при варьировании E, θ. Результаты расчетов представлены на рис. 10.

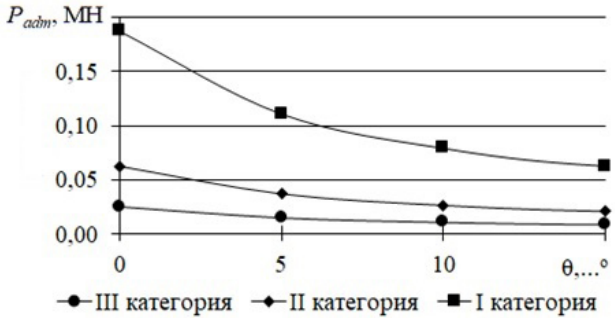


Рис.10. Допустимая нагрузка на колесо форвардера, МН, в зависимости от категории грунта и угла поворота движителя

Fig. 10. Permissible load on the forwarder wheel, MN, depending on the soil category and the angle of rotation of the mover

В общем случае, задаваясь допустимым значением h_{adm}, нагрузку P_{adm} найдем по уравнению

$$P_{adm} = \left[\frac{h_{adm} E}{1{,}27\left(1 + 0{,}0899\theta - 0{,}0012\theta^2\right)} \right]^{\frac{3}{2}}. \qquad (39)$$

Результаты расчета по формуле (39) показаны на рис. 10; в пересчете на допустимую массу $G_{w,adm}$, приведенную к единичному движителю, – на рис. 11.

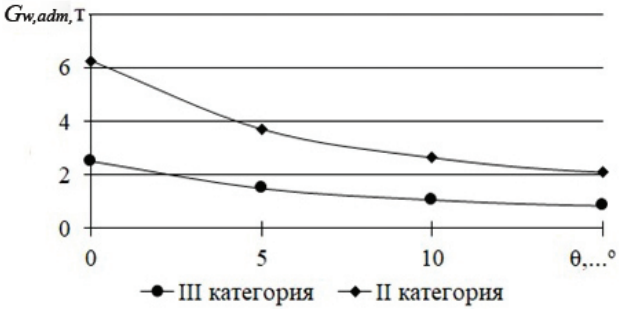


Рис. 11. Допустимая нагрузка на колесо форвардера, т, в зависимости от категории грунта и угла поворота движителя

Fig. 11. Permissible load on the forwarder wheel, t, depending on the soil category and the angle of rotation of the mover

Заключение

В общем виде производительность форвардерной трелевки оценивается при помощи математической модели, представленной формулами (1), (3), (4), (9), (10), (12)–(20). Управляемыми параметрами здесь являются масса форвардера, запас древесины на единицу площади, средний объем хлыста, плотность древесины, длины пасечных и магистральных волоков, модуль деформации почвогрунта и допустимая глубина колеи. Рейсовая нагрузка форвардера будет величиной, производной от его грузоподъемности (определяемой по статистической зависимости на основе массы машины) и максимальной нагрузки на колесо, которая находится аналитически в зависимости от свойств грунта и допустимой глубины колеи.

Моделирование напряжения и деформации грунта под воздействием движителя машины рассмотрено на основе решения задачи Буссинеска о вдавливании сферического индентора в упругое полупространство. Установлено, что лесные почвогрунты имеют смешанный характер образования колеи; на нее влияют деформации сжатия и сдвиг слоев почвогрунта. Обработка расчетных данных, полученных при варьировании свойств лесного грунта и нагрузки на колесо, показала, что степенная функция (36) с высокой точностью описывает формирование колеи.

Дальнейшее исследование решения задачи Буссинеска выявило, что учет дополнительных касательных напряжений и деформаций сдвига почвогрунта при повороте движителя возможен путем введения в функцию (38) поправочного коэффициента, учитывающего угол поворота (формула (36)). Для практических расчетов максимальной нагрузки на колесо при заданном допустимом значении глубины колеи получена многопараметрическая функция (39).

Определение общего вида регрессионных зависимостей, объясняющих с достаточной точностью влияние основных факторов на затраты времени по отдельным операциям, а также установление доверительных границ варьирования коэффициентов регрессионных зависимостей остаются задачами экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Абузов А.В., Григорьев И.В.* Конструктивные особенности канатных лесотранспортных систем на мягких пневматических опорах // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 1(37). С. 86–95.

Abuzov A.V., Grigoryev I.V. Design Features of Cable Forestry Systems on Soft Pneumatic Supports. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2020, vol. 10, no. 1(37), pp. 86–95. DOI: https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.1/9

2. *Божбов В.Е., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Тетеревлева Е.В., Чемшикова Ю.М.* Анализ подходов к описанию процессов взаимодействия движителей лесных машин с почвогрунтами лесосек // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 2. С. 13–35.

Bozhbov V.E., Grigorev I.V., Rudov S.E., Teterevleva E.V., Chemshikova Yu.M. Analysis of Approaches to the Description of Processes of Interaction of the Propulsion of Forest Machines with the Soil on the Cutting Area. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 13–35. DOI: https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4482

3. *Воронов Р.В., Марков О.Б., Григорьев И.В., Давтян А.Б.* Математическая модель модульного принципа подбора системы машин для создания и эксплуатации лесных плантаций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 125–134.

Voronov R.V., Markov O.B., Grigorev I.V., Davtyan A.B. Mathematical Model of the Modular Approach for Selection of a System of Machines for Creation and Operation of Forest Plantations. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 5, pp. 125–134. DOI: https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.125

4. *Григорьев И.В.* Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 236 с.

Grigorev I.V. *Reduction of the Negative Effect from Wheeled Skidders on Soils by Substantiation of Modes of Their Movement and Technological Equipment*. Saint Petersburg, SPbSFTU Publ., 2006. 236 p.

5. *Григорьев И.В.* Параметры и показатели работы перспективного форвардера для малообъемных лесозаготовок // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2018. Т. 6, № 4(40). С. 21–25.

Grigorev I.V. The Parameters and Indicators of Promising Forwarder for Low-Volume Logging. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice], 2018, vol. 6, no. 4(40), pp. 21–25.

6. *Григорьев И.В., Рудов С.Е.* Особенности эксплуатации колесных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest Engineering / под ред. И.И. Слепцова. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2018. С. 67–71.

Grigorev I.V., Rudov S.E. Operational Features of Wheeled Forest Machines in Complex Soil and Terrain Conditions. *Forest Engineering*. Ed. by I.I. Sleptsov. Yakutsk, NEFU Publ., 2018, pp. 67–71.

7. *Григорьев И.В., Чураков А.А.* Совершенствование конструкции активного полуприцепа форвардера на базе сельскохозяйственного колесного трактора // Транспортные и транспортно-технологические системы / отв. ред. Н.С. Захаров. Тюмень: ТИУ, 2018. С. 84–88.

Grigorev I.V., Churakov A.A. Improvement of the Construction of the Active Sewer-Trailer of the Forwarder on the Basis of Agricultural Wheel Tractor. *Transport and Transport-Technological Systems*. Ed. by N.S. Zakharov. Tyumen, IUT Publ., 2018, pp. 84–88.

8. *Григорьев И.В., Григорьева О.И., Чураков А.А.* Эффективные технологии и системы машин для малообъемных заготовок древесины // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 2. С. 61–66.

Grigorev I.V., Grigoreva O.I., Churakov A.A. Effective Technologies and Systems of Machines for Low-Volume Wood Logging. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2018, no. 2, pp. 61–66.

9. *Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В.* Средощадящие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 176 с.

Grigorev I.V., Zhukova A.I., Grigoreva O.I., Ivanov A.V. *Low Impact Technologies for Logging in the Northwestern Federal District of the Russian Federation*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2008. 176 p.

10. *Дмитриева М.Н., Григорьев И.В., Рудов С.Е.* Анализ исследований взаимодействия колесного движителя лесных машин со слабонесущим почвогрунтом // Resources and Technology. 2019. Т. 16, № 1. С. 10–39.

Dmitrieva M.N., Grigorev I.V., Rudov S.E. Interaction of Wheeled Forestry Machines with Non-Cohesive Soil. *Resources and Technology*, 2019, vol. 16, no. 1, pp. 10–39. DOI: https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4402

11. *Добрецов Р.Ю., Григорьев И.В., Рудов С.Е., Тетеревлева Е.В., Чемшикова Ю.М.* Увеличение подвижности гусеничных и колесных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 4–10.

Dobretsov R.Yu., Grigoryev I.V., Rudov S.E., Teterevleva E.V., Chemshikova Yu.M. Increase in Mobility of Track and Wheel Machines. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair, Reconditioning, Modernization], 2019, no. 11, pp. 4–10. DOI: https://doi.org/10.31044/1684-2561-2019-0-11-4-10

12. *Морозов Е.М., Зернин М.В.* Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 544 с.

Morozov E.M., Zernin M.V. *Contact Problems of Fracture Mechanics*. Moscow, LIBROKOM Publ., 2010. 544 p.

13. *Цытович Н.А.* Механика грунтов: краткий курс. М.: Высш. школа, 1983. 288 с.

Tsytovich N.A. *Mechanics of Soils*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983. 288 p.

14. *Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Рудов С.Е.* Особенности взаимодействия лесных машин с мерзлотными почвогрунтами // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2018. С. 187–188.

Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Rudov S.E. Features of Interaction of Forest Machines with Permafrost Soils. *Improving the Efficiency of the Forest Complex. Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2018, pp. 187–188.

15. *Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Жукова А.И., Иванов В.А.* Исследование механических процессов циклического уплотнения почвогрунта при динамических нагрузках // Вестн. КрасГАУ. 2008. № 1. С. 163–175.

Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Zhukova A.I., Ivanov V.A. Study of Mechanical Processes of Cyclic Soil Compaction under Dynamic Loads. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2008, no. 1, pp. 163–175.

16. Antoniade C., Şlincu C., Stan C., Ciobanu V., Ştefan V. Maximum Loading Heights for Heavy Vehicles Used in Timber Transportation. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2012, vol. 5(54), no. 1, pp. 7–12.

17. Cerato A.B., Lutenegger A.J. Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, vol. 29, iss. 6, pp. 507–516. DOI: https://doi.org/10.1520/GTJ100312

18. Grigorev M., Grigoreva A., Grigorev I., Kunickaya O., Stepanova D., Savvinova M., Sidorov M., Tomashevskaya E., Burtseva I., Zakharova O. Experimental Findings in Forest Soil Mechanics. *Eurasian Journal of Biosciences*, 2018, vol. 12, iss. 2, pp. 277–287.

19. Han S.-K., Han H.-S., Page-Dumroese D.S., Johnson L.R. Soil Compaction Associated with Cut-to-Length and Whole-Tree Harvesting of a Coniferous Forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, vol. 39(5), pp. 976–989. DOI: https://doi.org/10.1139/X09-027

20. Huber M.T. Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper. *Annalen der Physik*, 1904, vol. 319, iss. 6, pp. 153–163. DOI: https://doi.org/10.1002/andp.19043190611

21. Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D., Manukovsky A.Y., Zhuk A.Yu., Kunitskaya O.A., Grigoreva O.I. Environment-Friendly Logging in the Context of Water Logged Soil and Knob-and-Ridge Terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 22–27. DOI: https://doi.org/10.26480/jmerd.02.2018.22.27

22. Jarkko L. *Design Parameter Analysis of the Bogie Track Surface Pressure in Peatland Forest Operations*. Master of Science Thesis. Tampere, Tampere University of Technology, 2018. 59 p.

23. Khitrov E.G., Andronov A.V. Bearing Floatation of Forest Machines (Theoretical Calculation). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 695, art. 012020. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/695/1/012020

24. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing Quality of Road Pavements through Adhesion Improvement. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 678–694.

25. Lepilin D., Laurén A., Uusitalo J., Tuittila E-S. Soil Deformation and Its Recovery in Logging Trails of Drained Boreal Peatlands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, vol. 49, no. 7, pp. 743–751. DOI: https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0385

26. Nawaz M.F., Bourrié G., Trolard F. Soil Compaction Impact and Modelling. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, vol. 33, iss. 2, pp. 291–309. DOI: https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8

27. Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Teterevleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Z., Khaldeeva M.N., Burtseva I.A., Danilov V.V., Grigorev I.V. Theoretical Approaches to Logging Trail Network Planning: Increasing Efficiency of Forest Machines and Reducing Their Negative Impact on Soil and Terrain. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2019, vol. 16, no. 4, pp. 61–75. https://doi.org/10.3233/AJW190049

28. Stankić I., Poršinsky T., Tomašić Ž., Tonković I., Frntić M. Productivity Models for Operational Planning of Timber Forwarding in Croatia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2012, vol. 33, no. 1, pp. 61–78.

THEORETICAL STUDIES OF FORWARDER PRODUCTIVITY WITH LIMITED IMPACT ON SOILS

Olga N. Burmistrova*[1]*, *Doctor of Engineering, Prof.;*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2616-7557
Alexey A. Prosuzhih*[1]*, *Senior Lecturer; ResearcherID: AAJ-2312-2020,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1968-3713
Egor G. Khitrov*[2]*, *Candidate of Engineering; ResearcherID: R-8199-2016,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4569-9508
Olga A. Kunitskaya*[3]*, *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: AAC-9568-2020,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8542-9380
Elena N. Luneva*[4]*, *Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4363-5746
[1]Ukhta State Technical University, ul. Pervomayskaya, 13, Ukhta, Komi Republic, 169300, Russian Federation; e-mail: olga.burm@mail.ru
[2]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, ul. Politechnicheskaya, 29, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; e-mail: yegorkhitrov@gmail.com
[3]Arctic State Agrotechnological University, sh. Sergelyakhskoye, 3-y km, 3, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), 677007, Russian Federation; e-mail: ola.ola07@mail.ru
[4]Don State Agrarian University, ul. Krivoshlykova, 24, pos. Persianovskiy, Oktyabr'skiy District, Rostov Region, 346493, Russian Federation; e-mail: hizz90@yandex.ru

Abstract. Wheeled forest machines currently dominate the logging industry in Russia and in the world. Every year in Russia, the share of machine-made wood harvesting using Scandinavian technology increases, which involves felling trees, delimbing, and bucking them at a swath. Moreover, this technology is used not only for conventional two-machine systems with harvester and forwarder. In some regions of Siberia three-machine systems are gaining popularity. They consist of a feller-buncher, a swath processor, and a forwarder for

skidding obtained logs. The issue of increasing the efficiency of forwarders is relevant for the timber industry. Its solving is possible on the basis of a comprehensive assessment of design solutions with the use of modern modeling and process optimization tools at the stage of development design. This approach requires deep theoretical and experimental research and is of great scientific and practical interest. When determining the maximum volume of skidded wood, the following machine limitations are considered: by bearing capacity; by tangential traction force; by the traction of the mover with the soil (tangential traction force should not exceed the traction force of the mover with the driving surface – the soil of the logging site). Besides this, there are recommendations to limit the weight of the skidder with the load, based on the permissible track depth after the first pass of the machine; it is believed that this figure should not exceed 20 cm. This statement is supported by the results of studies of the track development under the cyclic influence of the wheel mover (that is when the forwarder repeatedly passes the same section of the portage). This raises the question of forwarder productivity in the skidding operation with the regard to the track depth limitation.
For citation: Burmistrova O.N., Prosuzhih A.A., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Luneva E.N. Theoretical Studies of Forwarder Productivity with Limited Impact on Soils. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 101–116. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-101-116

Keywords: logging, forwarder productivity, skidding system, soils.

Поступила 19.01.20 / Received on January 19, 2020

УДК 630.36
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-117-124

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЗМА ДЛЯ ОЧИСТКИ ДЕРЕВЬЕВ ОТ СУЧЬЕВ МНОГООПЕРАЦИОННЫМИ ЛЕСНЫМИ МАШИНАМИ

К.П. Рукомойников, д-р техн. наук, доц.; *ResearcherID: N-6961-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9956-5081*
В.О. Купцова, соискатель; *ResearcherID: AAY-9130-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4330-0594*
Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; e-mail: RukomojnikovKP@volgatech.net, vika13244@rambler.ru

Аннотация. Принципы увеличения доли использования на лесосеке современных многофункциональных лесных машин (харвестеров и процессоров) для валки и очистки деревьев от сучьев в России и за рубежом в настоящее время находят все более широкое распространение и заслуживают повышенного внимания со стороны исследователей. Нами разработаны новые конструкции технологического оборудования и найдены технические решения, не применявшиеся ранее. Идея создания рабочим органом многофункциональных лесных машин дополнительной ударной нагрузки в процессе обработки ствола дерева является одним из эффективных вариантов развития дополнительного усилия резания, позволяющего облегчить процесс работы устройства. Предложенный способ предполагает очистку ствола протаскивающими вальцами и представляет собой комбинацию работы стандартных сучкорезных ножей, совмещенных с захватными рычагами, и дополняющего конструкцию возвратно-поступательно движущегося сучкорезного ножа. Такой характер его движений обеспечивается использованием энергии сжатого воздуха. Это создает новый для конструкции принцип действия режущего механизма. Приведены подробное описание устройства, его работы, а также варианты взаимодействия отдельных технологических элементов. Реализация предложенной идеи позволит внедрить в сферу лесного хозяйства харвестерные и процессорные головки, способствующие облегчению функционирования отдельных узлов лесосечных машин с большим средним объемом хлыста.
Для цитирования: Рукомойников К.П., Купцова В.О. Модернизация конструкции механизма для очистки деревьев от сучьев многооперационными лесными машинами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 117–124. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-117-124
Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке ООО «Мартрэйд» в рамках научно-исследовательской темы №06.522/18.

Ключевые слова: харвестерная головка, процессорная головка, валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина, ударный механизм, очистка деревьев от сучьев, нож, перфоратор.

Введение

Современные многофункциональные лесные машины (харвестеры и процессоры) для валки и очистки деревьев от сучьев на пасеке находят все большее распространение в мире и вызывают интерес исследователей. Эффективный комплекс последовательно реализуемых одной лесозаготовительной машиной обрабатывающих операций, включающий в себя валку деревьев, очистку их от

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

сучьев и раскряжевку на сортименты хорошо известен среди лесозаготовителей разных стран и является одной из очевидных причин возрастающего спроса на данный вид техники. Вывод об актуальности, научной и практической обоснованности постепенного повсеместного применения таких машин и модернизации их технологического оборудования является очевидным фактом для дальнейшего развития принципов эффективного ведения лесного хозяйства в Российской Федерации [2, 6, 9, 19].

Работы российских ученых Мазуркина П.М. [3], Пошарникова Ф.В. [8], Сюнева В.С. [11], Шегельмана И.Р. [4] и др. показывают возможные варианты совершенствования технических и технологических принципов работы многофункциональной лесной техники. Пути дальнейшей модернизации машин для валки и очистки деревьев от сучьев хорошо прослеживаются на основе выполненного исследователями функционально-технологического анализа [1] с созданием обобщенной матрицы, демонстрирующей варианты повышения эффективности работы технологического оборудования. Рекомендации, изложенные в работах названных ученых, получили развитие в данной статье, повлияли не ее основные теоретические положения и выводы.

Объекты и методы исследования

В основу исследования положен метод патентного поиска и анализа существующих технических и технологических решений по модернизации основного оборудования харвестеров и процессоров [5, 12, 14–16]. По результатам работы выявлен широкий круг представляющих интерес конструктивных решений. Среди них варианты модернизации технических элементов рабочих органов машин, указанные в патентах [5, 18, 20]. Особое внимание уделено модификации протаскивающих вальцов, которые установлены на подвижных захватах, и конструктивным особенностям условно неподвижного сучкорезного ножа, закрепляемого на корпусах харвестерных и процессорных головок для обрезки сучьев, примыкающих к корпусу анализируемого рабочего органа лесных машин. Прижимные вальцы устройства, с двух сторон охватывающие ствол и выполняющие протаскивающие функции, обеспечивают усилие, необходимое для срезания сучьев, соприкасающихся с заостренными лезвиями сучкорезных ножей.

Высокие требования к приводу протаскивающих вальцов (возможность развития усилия, необходимого для срезания сучьев) являются недостатком данного варианта механизма и способа реализации его работы.

Возможность увеличения усилия протаскивания ствола дерева реализована в патентах [13, 17]. Предусмотрено наличие протаскивающих вальцов в количестве 3 шт., эффективно сжимающих ствол дерева по периметру. Причем один из них установлен на корпусе конструкции, а остальные надежно закреплены на подвижных захватах. Однако данный вариант не лишен недостатков и также подразумевает установку на харвестерные и процессорные головки лесных машин мощных протаскивающих вальцов, что связано в первую очередь с тем, что основной действующей нагрузкой при удалении сучьев является лишь усилие, развиваемое при вращении протаскивающих вальцов. Другие элементы конструкции, оказывающие дополнительное механическое воздействие на обрабатываемый ствол, отсутствуют во всех рассмотренных ранее технических решениях.

В то же время хорошо известны высокоэффективные варианты создания дополнительной ударной нагрузки. В серийном производстве есть перфораторы, в конструкцию которых входят не только ударные механизмы, но и оригинальные варианты различных устройств для гашения вибрации при работе. Особенности пневмоударных механизмов позволяют достичь повышенного давления путем действия сжатого воздуха в корпусе конструкции. Это увеличивает ударную нагрузку в 2,8 раза, что теоретически соответствует росту воздушного давления с 0,5 до 1 МПа и даже в 8 раз, т. е. до 2 МПа [10].

Одним из возможных вариантов снижения усилий резания при работе ножей рабочих органов многофункциональных лесных машин, осуществляющих очистку деревьев от сучьев, является создание механизма, обеспечивающего дополнительную ударную нагрузку в процессе обработки ствола дерева.

Результаты исследования и их обсуждение

Варианты модернизации способа действия и рабочих органов харвестера и процессора, найденные в ходе детального исследования существующих технических решений, реализованы в виде патента на изобретение [7]. На рис. 1 показана модернизированная конструкция рабочего органа: на рис.1, *а* демонстрируется общий вид нового рабочего органа машины; на рис.1, *б* – принцип работы шестеренок привода модернизированного элемента разработанной конструкции.

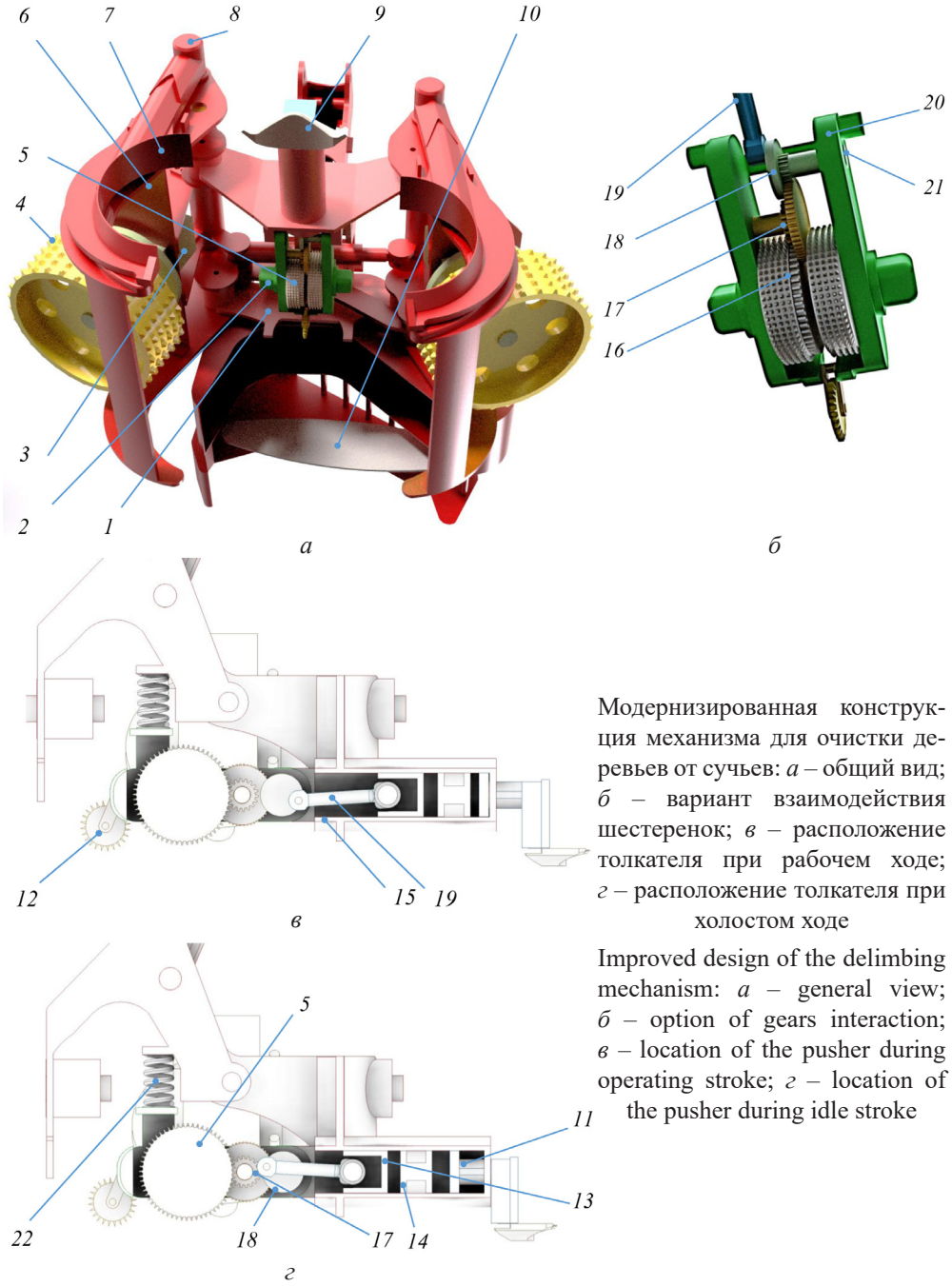
Предложенный способ предполагает очистку ствола протаскивающими вальцами в момент его прохождения через них и совмещает работу стандартных сучкорезных ножей, объединенных с захватными рычагами, и возвратно-поступательно движущегося сучкорезного ножа.

Использование энергии сжатого воздуха между толкателем и поршнем обеспечивает возвратно-поступательное движение толкателя, создавая новый для этой конструкции принцип действия режущего механизма. Эффективным результатом является ударное воздействие поршня на шток и его возврат в первоначальное положение при появлении зоны разреженного воздуха в специальном герметичном корпусе и обратном движении толкателя.

Модернизированный рабочий орган, представляющий собой несущий корпус *1*, который оснащен гидромоторами *2*, *3* и движущимися за счет их работы протаскивающими вальцами *4*, *5*, навешивается на манипулятор харвестера или процессора. Причем протаскивающий валец *5* установлен на несущем корпусе устройства, а вальцы *4* расположены на захватах *6* таким образом, что при зажиме ствола они удерживают его с трех сторон. Конструкция оснащена захватывающими ствол дерева сучкорезными ножами *7*, установленными на осях *8*. Кроме основных подвижных ножей конструкция предусматривает наличие условно-неподвижного сучкорезного ножа *9*, не имеющего возможности поворота вокруг своей оси и отвечающего за обрезку сучьев со стороны, прижимаемой к несущему корпусу устройства. В нижней части конструкции для раскряжевки ствола установлен механизм *10*.

Установка условно-неподвижного сучкорезного ножа предполагается на верхней части подвижного штока *11*, а стандартный механизм *12* для отмера выпиливаемых бревен вмонтирован на корпусе.

В состав нового для предлагаемого рабочего органа ударного механизма входят толкатель *13* и поршень *14*. Их функционирование осуществляется внутри корпуса *15*, имеющего герметичную конструкцию.



Модернизированная конструкция механизма для очистки деревьев от сучьев: *а* – общий вид; *б* – вариант взаимодействия шестеренок; *в* – расположение толкателя при рабочем ходе; *г* – расположение толкателя при холостом ходе

Improved design of the delimbing mechanism: *а* – general view; *б* – option of gears interaction; *в* – location of the pusher during operating stroke; *г* – location of the pusher during idle stroke

Взаимодействие ряда последовательно установленных шестеренок *17* обеспечивается их совмещением с зубчатым колесом *16*, фиксируемым на поверхности протаскивающего вальца *5*. Это создает возможность эффективной передачи крутящего момента с повышением скорости вращения ведомой шестерни *18*, представляющей собой маховик кривошипно-шатунного устройства *19*, приводящего в действие механизм удара.

Корпус *20*, внутри которого установлены элементы *5*, *16*, *17*, *18*, навешивается на ось *21*, а для прижима к стволу дерева расположенного внутри

него протаскивающего вальца поворот корпуса осуществляется посредством механизма *22*.

Наличие значительно числа зубчатых колес, характерных для модернизированной конструкции харвестерной (процессорной) головки, неизбежно создает риск механических повреждений и загрязнений. Для снижения вероятности возникновения негативных последствий из-за попадания в механизм посторонних предметов подвижные части корпуса *20* должны быть надежно закрыты защитным кожухом (на рисунке не отмечен).

Работа модернизированной конструкции механизма для очистки деревьев от сучьев предусматривает следующую последовательность действий: сучкорезные ножи, захваты и протаскивающие вальцы захватывают ствол дерева; прижимаемый к корпусу устройства ствол воздействует на протаскивающий валец, поворачивающийся на оси, придавливая его к корпусу и переводя прижимной механизм в сжатое состояние; подвижные и условно-неподвижный сучкорезный ножи охватывают ствол по периметру, создавая вокруг него режущее кольцо; движение ствола осуществляется вдоль его оси при включении привода протаскивающих вальцов.

Перемещение отдельных элементов модернизированной конструкции поясняется рисунками. На рис. 1, *в* демонстрируется состояние механизма при поступательном перемещении толкателя, сопровождающимся ударом поршня по штоку; на рис. 1, *г* – результат обратного движения толкателя.

Вращение прижатого к корпусу протаскивающего вальца синхронизировано с вращением жестко закрепленного на нем зубчатого колеса, входящего в зацепление и передающего вращение на ряд шестеренок и далее к маховику. Маховик в свою очередь приводит в движение (поступательное) толкатель. Использование герметичного корпуса позволяет создать зону повышенного давления воздуха в момент движения толкателя к поршню и пониженного при обратном ходе первого, что переводит второй в режим резких возвратно-поступательных движений и ударов по штоку.

Вслед за фиксацией специальным механизмом необходимой для раскряжевки ствола длины лесоматериала осуществляется остановка протаскивающих вальцов, срабатывает привод пильного механизма с отделением от ствола нового сортимента. Описанный цикл действий выполняется до завершения обработки дерева.

Дальнейшая проработка конструкции с ее внедрением в производство ставит перед исследователями оптимизационные задачи, связанные с повышением КПД путем варьирования значений, передаточных отношений, а также ударных нагрузок при изменении скоростей движения и массы движущихся элементов.

Заключение

Предложенный в статье вариант модернизации конструкции харвестерных и процессорных головок с дополнительным ударным воздействием режущих механизмов может использоваться как способ снижения функциональной нагрузки на отдельные узлы рабочих органов многофункциональных лесосечных машин при обработке крупномерных деревьев и повышать эффективность их работы при заготовке на лесосеке хлыстов и сортиментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Будник П.В., Демчук А.В*. Функционально-технологический анализ харвестерной головки // Наука и бизнес: пути развития. 2012. № 9(15). С. 36–38.

Budnik P.V., Demchuk A.V. Functional and Technological Analysis of Harvesting Head. *Nauka i biznes: puti razvitiya* [Science and Business: Development Ways], 2012, no. 9(15), pp. 36–38.

2. *Демчук А.В.* Модернизация технологического оборудования харвестера для повышения эффективности вывозки сортиментов // Инж. вестн. Дона. 2012. Т. 20, № 2. С. 542–546.

Demchuk A.V. Modernization of processing equipment of a harvester for increase efficiency of removal of assortments. *Inženernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don], 2012, vol. 20, no. 2, pp. 542–546.

3. *Мазуркин П.М.* Поисковое конструирование лесотехнического оборудования. Саранск: Изд-во Сарат. ун-та. Саран. фил., 1990. 304 с.

Mazurkin P.M. *Exploratory Research Design of Forestry Equipment*. Saransk, Saransk Branch of Saratov University Publ., 1990. 304 p.

4. Патент № 117259 Российская Федерация, МПК A01G 23/095 (2006.01) B27L 1/00 (2006.01). Рабочий орган валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины для выработки сортиментов: № 2012102528/13: заявл. 25.01.2012: опубл. 27.06.2012 / И.Р. Шегельман, О.Н. Галактионов, А.В. Демчук.

Shegelman I.R., Galaktionov O.N., Demchuk A.V. *Working Body of a Felling-Body-Cutting-Striping Machine for Producing Sortment*. Patent RF, no. RU 117259 U1, 2012.

5. Патент № 2513415 Российская Федерация, МПК A01G 23/083. Валочное устройство для валки и обрезки сучьев на стволах деревьев и лезвие для обрезки сучьев: № 2011134264/13: заявл. 15.01.2010: опубл. 20.04.2014 / Ю. Кескинен, К. Киннунен, К. Ханне.

Keskinen J., Kinnunen K., Khanne K. *Feller Device for Felling and Limbing on Tree Trunks and Blade for Limbing*. Patent RF, no. RU 2513415 C2, 2014.

6. Патент № 2676139 Российская Федерация, МПК A01G 23/095 (2006.01), B27L 1/00 (2006.01). Способ выработки окоренных сортиментов и рабочий орган для его осуществления: № 2017145977: заявл. 26.12.2017: опубл. 26.12.2018 / Е.М. Царев, С.Е. Анисимов, К.П. Рукомойников, Ю.А. Коновалова, С.В. Ведерников, В.М. Заболотский, Н.С. Анисимов, И.С. Анисимов.

Tsarev E.M., Anisimov S.E., Rukomojnikov K.P., Konovalova Yu. A., Vedernikov S.V., Zabolotskij V.M., Anisimov N.S., Anisimov I.S. *Method of Developing Barked Assortments and Working Body for Implementation Thereof*. Patent RF, no. RU 2676139 C1, 2018.

7. Патент № 2682037 Российская Федерация, МПК A01G 23/08 (2006.01), A01G 23/095 (2006.01). Способ обрезки сучьев деревьев и конструкция механизма для его осуществления: № 2017145836: заявл. 26.12.2017: опубл. 14.03.2019 / К.П. Рукомойников, С.В. Ведерников, М.И. Габдрахманов.

Rukomojnikov K.P., Vedernikov S.V., Gabdrakhmanov M.I. *Method of Pruning Tree Branches and Design of Mechanism for Its Implementation*. Patent RF, no. RU 2682037 C1, 2019.

8. *Пошарников Ф.В., Юдина Н.Ю., Буланов А.С., Леденцов П.С.* Анализ состояния технического оснащения лесозаготовительной промышленности // Лесотехн. журн. 2012. № 2. С. 100–105.

Posharnikov F.V., Yudina N.Yu., Bulanov A.S., Ledentsov P.S. Analysis of the State of Technical Equipment of the Timber Industry. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2012, no. 2, pp. 100–105.

9. *Рукомойников К.П., Ведерников С.В.* Модернизация сучкорезного ножа харвестерной головки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 1. С. 120–127.

Rukomoynikov K.P., Vedernikov S.V. Modernization of Harvester Head Delimbing Knife. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2019, no. 1, pp. 120–127. DOI: https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.1.120

10. *Сабитов А.Э.* Обоснование параметров перфоратора с ударной системой «поршень-боек-штанга» для бурения коротких шпуров с сухой продувкой: дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2016. 147 с.

Sabitov A.E. *Substantiation of Parameters of a Perforator with Percussion System "Piston-Peen-Bar" for Drilling of Short Boreholes with Dry Blowing*: Cand. Eng. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2016. 147 p.

11. *Сюнёв В.С., Селивёрстов А.А.* Рабочие органы харвестеров: проектирование и расчет. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. 204 с.

Syunev V.S., Seliverstov A.A. *Harvester Working Bodies: Design and Calculation*. Petrozavodsk, PetrSu Publ., 2005. 204 p.

12. Alfthan A. *Feed Means and Log Processing Head*. Patent EPA, no. EP 3202253 A1, 2017.

13. Alfthan A., Palmroth L. *Log Processing Head*. Patent EPA, no. EP 3391737 A1, 2018.

14. Bisballe C. *Harvester Head Assembly*. Patent US, no. US 9591810 B2, 2017.

15. Kaye B.J. *Timber-Working Head and Method of Operation*. Patent US, no. US 9999180 B2, 2018.

16. Moisio J. *Timber Harvester*. Patent US, no. US 5732754 A, 1998.

17. Niemi P. *Delimbing Device and a Method in a Delimbing Device*. Patent US, no. US 6318425 B1, 2001.

18. Peterson R.A. *Four Roller Tree Harvester Head*. Patent US, no. US 9232701 B1, 2016.

19. Rukomojnikov K., Vedernikov S., Gabdrahmanov M. A Method for Delimbing Tree-Trunks and a Device for Applying the Method. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 263–266. DOI: https://doi.org/10.5937/jaes16-16442

20. Wildey A.J. *Tree Harvesting and Processing Head*. Patent US, no. US 5785101 A, 1998.

DESIGN IMPROVEMENT OF THE MECHANISM OF DELIMBING BY MULTI-OPERATIONAL FOREST MACHINES

Konstantin P. Rukomojnikov, *Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;*
ResearcherID: N-6961-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9956-5081
Viktoriia O. Kuptcova, *External PhD Student; ResearcherID: AAY-9130-2020,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4330-0594
Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; e-mail: RukomojnikovKP@volgatech.net, vika13244@rambler.ru

Abstract. The principles of increasing the use of modern multifunctional forest machines (harvesters and processors) for felling and delimbing in Russia and abroad are currently becoming more widespread and deserve increased attention from researchers. The results of the studies performed made it possible to identify a wide range of constructive solutions of technological equipment interesting in the opinion of the authors of the publication and

to develop a new technical solution. The idea of creating an additional shock load by the working body of multifunctional forest machines for delimbing during the processing of a tree trunk is one of the most effective options for the development of additional cutting force, allowing to facilitate the operation of the device. The proposed method involves delimbing the trunk by pulling rollers and is a combination of the operation of standard delimbing knives together with the gripping arms and a reciprocating delimbing knife that complements the design. The use of compressed air energy provides the reciprocating motion of the knife, creating a new principle of the cutting mechanism for this design. The article describes in detail the design of the device, its operation, as well as options for the interaction of individual technological elements. The implementation of the proposed idea will make it possible to introduce harvester and processor heads into the forestry sector, facilitating the operation of individual assemblies of forest machines with large average volume of the tree-length log.
For citation: Rukomojnikov K.P., Kuptcova V.O. Design Improvement of the Mechanism of Delimbing by Multi-Operational Forest Machines. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 117–124. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-117-124
Funding: The work was carried out with the financial support of OOO “Martrade” within the framework of the research project No. 06.522/18.

Keywords: harvester head, processor head, feller-delimber-buncher, percussion mechanism, delimbing, knife, perforator.

Поступила 28.01.20 / Received on January 28, 2020

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.817-41
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-125-132

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ХВОИ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДРЕВЕСНОВОЛОКНИСТОЙ ПЛИТЫ

М.А. Зырянов, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: N-6950-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4525-2124*
С.О. Медведев, канд. экон. наук; *ResearcherID: N-8240-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7459-3150*
А.П. Мохирев, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: N-9961-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1692-3323*
Лесосибирский филиал Сибирского государственного технологического университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнёва, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; e-mail: zuryanov13@mail.ru, medvedev_serega@mail.ru, ale-mokhirev@yandex.ru

Аннотация. До недавнего времени в лесной промышленности признавался ценным только ствол дерева, а все остальное, в том числе крона, считалось отходами. Отходы лесозаготовок загромождали лесосеки и создавали благоприятную среду для размножения вредителей, а также способствовали возникновению пожаров. Сейчас в лесозаготовительной отрасли древесная зелень выступает сырьем для производства гранулированного топлива; в лесохимическом комплексе – для изготовления хлорофиллокаротиновых паст, хлорофиллина натрия, хвойного лечебного экстракта; в агропромышленном производстве – для получения хвойно-витаминной муки. Древесноволокнистые плиты широко применяются в домостроении в качестве конструкционных, отделочных и изоляционных материалов. Достоинством этих плит является возможность придания им специальных свойств: огнестойкости, водостойкости, биостойкости, звукоизоляционной и теплоизоляционной способностей – за счет добавления в композицию на стадии изготовления различных компонентов. С целью расширения сырьевой базы для производства древесноволокнистых плит выполнены исследования влияния добавки хвойной муки на качественные показатели и физико-механические характеристики готового изделия. Обоснована возможность применения данного сырья в виде хвойной муки при производстве древесноволокнистых плит. Показано влияние процентного содержания муки из хвои в общем объеме древесноволокнистой массы и размеров частиц на качественные показатели материала. Получены статистическо-математические уравнения и графические зависимости, позволяющие прогнозировать характеристики древесноволокнистых плит при заданном содержании и размерах частиц муки из древесной зелени хвойных пород. Определены оптимальные размеры данных показателей, при которых физико-механические свойства готовой продукции соответствуют требованиям ГОСТа.
Для цитирования: Зырянов М.А., Медведев С.О., Мохирев А.П. Влияние добавки измельченной хвои на качественные показатели древесноволокнистой плиты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 125–132. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-125-132

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

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-1902.2019.6. Проект «Разработка и внедрение эффективной технологии комплексной переработки лесосечных отходов» подготовлен при поддержке Красноярского краевого фонда науки.

Ключевые слова: древесноволокнистая плита, прочность при статическом изгибе, плотность древесноволокнистой плиты, древесная зелень, хвоя, отходы, волокно, порубочные остатки.

Введение

Потребность в древесном сырье непрерывно возрастает, поэтому актуальным становится вопрос об использовании в качестве сырья не только стволовой части дерева, ветвей и сучьев, но и хвои. Как показал анализ литературных источников [1, 7–9], зелень хвойных пород, обладая богатым запасом биологически активных веществ (эфирные масла, витамины, каротин, углеводы, микроэлементы и протеины), является ценным сырьем для лесохимического производства. Технология изготовления любого вида продукции из нее включает такие операции, как сбор древесной зелени, отделение хвои от веток с последующим измельчением [10–15, 17–20]. В настоящее время используется только около 3–4 % потенциальных ресурсов хвои, что связано с отсутствием технологий ее переработки в условиях лесосеки. С целью увеличения объемов внедрения хвои в процесс производства в филиале СибГУ в г. Лесосибирске такая технология была разработана, она предполагала применение инновационной мобильной установки (патент на изобретение № 2698059 от 21.08.2019). Конструкция предлагаемого механизма, способного перемещаться по территории лесосеки, позволяет осуществлять операции по отделению и измельчению древесной зелени хвойных пород и последующей упаковке полученного продукта. Это делает возможным получение хвойного полуфабриката требуемого фракционного состава с сохранением всех полезных веществ.

Как показал анализ работ ряда авторов [2–6, 16], одним из недостаточно изученных направлений использования полуфабриката из хвои, является его добавление в древесноволокнистую плиту (ДВП). Коротаев Э.И. и Симонов В.И. [6] отмечают, что данное сырье в составе ДВП повлияет на внешний вид конечного продукта. Зырянов М.А. и др. [3–5], напротив, говорят об отсутствии изменения качественных показателей древесноволокнистых плит в случае применения при их производстве древесной зелени хвойных пород.

Целью работы является выявление закономерностей влияния добавки муки из отходов древесной зелени хвойных пород на качественные показатели ДВП.

Объекты и методы исследования

Экспериментальные исследования были проведены на территории лесосек Ангаро-Енисейского района. Отбор образцов осуществлялся с нормально развитых особей по 2 веточки с нижней, средней и верхней частей кроны мо-

лодых, спелых и перестойных деревьев по 20 хвоинок с 4 равноудаленных частей лапки. Всего в каждом эксперименте участвовало 720 хвоинок (по 20 хвоинок с 3 возрастов, 3 частей кроны, 4 равноудаленных частей). Отобранный материал герметично упаковывался с целью сохранения влажности и транспортировался в лабораторию для исследований.

Предварительно, в ходе серии поисковых экспериментов было установлено, что при добавлении в ДВП частиц хвои размерами менее 0,2 мм и более 0,8 мм в процентном содержании свыше 16 % значительно ухудшаются качественные показатели ДВП. Измельченную до заданных размеров древесную зелень сосны смешивали с древесноволокнистой массой, произведенной на заводе ДВП АО «Лесосибирский ЛДК № 1», формировали древесноволокнистый ковер и прессовали по 5 плиток на каждый опыт в лабораторном прессе по стандартной циклограмме. Качество конечного продукта оценивали по значениям его физико-механических показателей, определяемых стандартными методами, приведенными в ГОСТ 4598–86, в лабораторных и производственных условиях.

Исследование выполнено с использованием системного и комплексного подходов; числового моделирования, математического планирования и статистического анализа – применительно к научной проблематике. Активный эксперимент стал основным методом получения статистически-математического описания исследуемого процесса [11].

В качестве входных факторов были выбраны процентное содержание измельченной хвои в общей массе (q), размер частиц хвои (f); выходных параметров – плотность (P), предел прочности при статическом изгибе (Pr), водопоглощение (N), набухание (R) ДВП.

Основные характеристики моделей представлены в виде функциональной зависимости

$$Pr, P, N, R = f(q, f). \quad (1)$$

Интервалы варьирования входных параметров исследуемого процесса следующие: (0,2±0,01) мм $\leq f \leq$ (0,8±0,03) мм, (4±0,1) мм $\leq q \leq$ (16±0,3) мм.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе обработки экспериментальных данных получены уравнения, описывающие зависимости физико-механических показателей ДВП от размера частиц измельченной хвои и ее процентного содержания в общей массе изделия:

$$Pr = 1580{,}13 - 16{,}85q + 50{,}07f + 0{,}08qf - 0{,}03q^2 + 0{,}34f^2; \quad (2)$$

$$P = 23\,742{,}05 - 186{,}87q - 642{,}22f + 1{,}71qf + 1{,}05q^2 + 3{,}22f^2; \quad (3)$$

$$N = -35\,749{,}2 + 127{,}01q + 965{,}86f - 1{,}24qf + 0{,}08q^2 - 4{,}66f^2; \quad (4)$$

$$R = -16\,327{,}4 + 10{,}12q + 453{,}49f - 0{,}18qf + 0{,}56q^2 - 2{,}22f^2. \quad (5)$$

Расчеты подтвердили, что все коэффициенты регрессионных уравнений значимы.

Для наглядности и более полной оценки влияния исследуемых факторов на физико-механические показатели ДВП по уравнениям (2)–(5) построены поверхности отклика. Они дают развернутое представление о зависимости названных показателей от процентного содержания хвои и размеров ее частиц.

Как видно из представленной на рис. 1 графической зависимости и из уравнения (2), предел прочности получаемых плит возрастает при увеличении содержания древесной зелени от 2 до 10 % и снижается при увеличении более 12 %. Данный показатель также уменьшается с ростом размера добавляемых в общую массу частиц хвои; при увеличении от 0,2 до 0,8 мм – незначительно уменьшается и достигает 33–34 МПа.

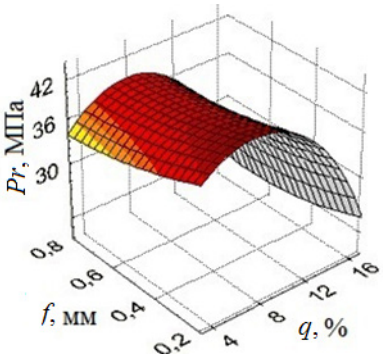


Рис. 1. Зависимость предела прочности при статическом изгибе плиты от содержания измельченной хвои в общей массе и размеров частиц хвои

Fig. 1. Dependence of the board static bending strength on the content of chopped needles in the total mass and the needle particle size

Графическая зависимость (рис. 2) и уравнение (3) показывают, что плотность получаемых плит возрастает при увеличении содержания измельченной хвои и размеров ее частиц и достигает своего максимального значения 980–990 кг/м³ при добавлении в общую массу 15–16 % измельченной хвои размером 0,7–0,8 мм.

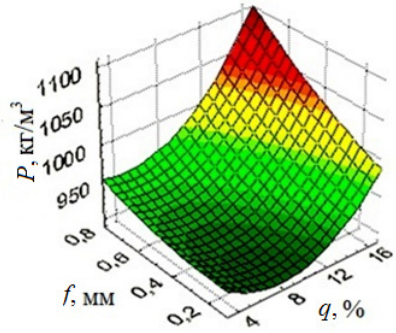


Рис. 2. Зависимость плотности плиты от содержания измельченной хвои в общей массе и размеров частиц хвои

Fig. 2. Dependence of the board density on the content of chopped needles in the total mass and the needle particle size

Как следует из представленных на рис. 3, 4 графических зависимостей и уравнений (3), (4), водопоглощение и набухание ДВП улучшаются при добавлении измельченной хвои. Они возрастают при увеличении размеров ее частиц и содержания (до 8 %) в общей массе, достигая своих максимальных значений 33–34 и 22–23 % соответственно при добавлении 15–16 % измельченной хвои и размере 0,7–0,8 мм.

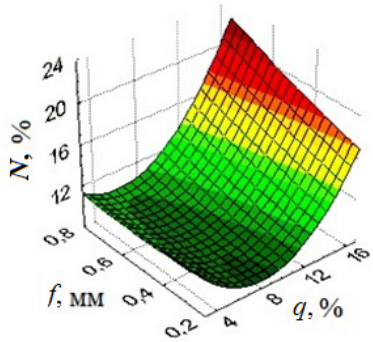


Рис. 3. Зависимость показателя водопоглощения плиты от содержания измельченной хвои в общей массе и размеров частиц хвои

Fig. 3. Dependence of the board water-absorbing capacity index on the content of chopped needles in the total mass and the needle particle size

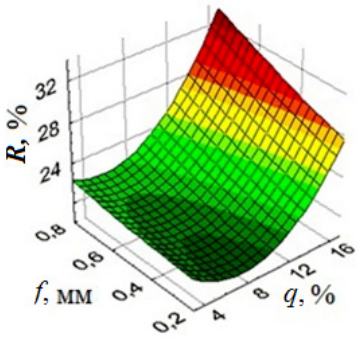
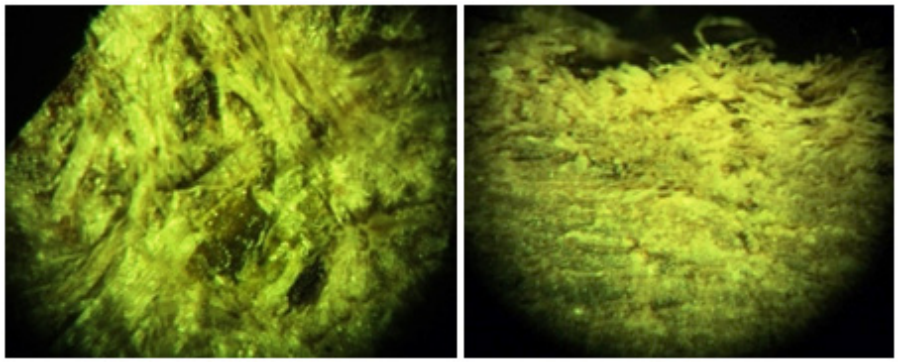


Рис. 4. Зависимость показателя набухания плиты от содержания измельченной хвои в общей массе и размеров частиц хвои

Fig. 4. Dependence of the board swelling index on the content of chopped needles in the total mass and the needle particle size

С целью исследования процесса формирования тела плиты при добавлении измельченной хвои выполнен анализ ДВП при помощи цифрового микроскопа ЛВ-34 с максимальным увеличением до 100 крат.



а *б*

Рис. 5. Лицевая пласть (*а*) и ребро (*б*) плиты с добавлением измельченной хвои, увеличение 70 крат

Fig. 5. The front face (*а*) and edge (*б*) of the board with the addition of chopped needles, 70x magnification

Анализ фотографий (рис. 5) показывает, что частицы хвои заполняют свободное пространство между крупным и средним волокном.

Заключение

Таким образом, полученные в ходе исследований статистическо-математические уравнения, графические зависимости и фотографии, описывающие процесс производства древесноволокнистых плит с добавлением измельченной хвои, позволяют прогнозировать получение качественного продукта в зависимости от размеров частиц хвои и ее процентного содержания в общей массе. Анализ результатов показал, что значения физико-механических показателей древесноволокнистой плиты при добавлении измельченой хвои с размером частиц 0,2–0,5 мм в общем объеме массы 10–12 % соответствуют группе Б по ГОСТ 4598–86. Использование хвои в производстве ДВП позволит снизить количество образующихся лесосечных отходов и решить ряд проблем в области экологической и пожарной безопасности, при этом качественные показатели плиты сохранятся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Безруких Ю.А., Медведев С.О., Алашкевич Ю.Д., Мохирев А.П.* Рациональное природопользование в условиях устойчивого развития экономики промышленных предприятий лесного комплекса // Экономика и предпринимательство. 2014. № 12-2. С. 994–996.

Bezrukikh Yu.A., Medvedev S.O., Alashkevich Yu.D., Mokhirev A.P. Environmental Management in the Conditions for Sustainable Economic Development Industrial Forestry Complex Enterprises. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Journal of Economy and entrepreneurship], 2014, no. 12-2, pp. 994–996.

2. *Гончаров В.Н.* Теоретические основы размола волокнистых материалов в ножевых машинах: дис. …д-ра техн. наук. Л., 1990. 474 с.

Goncharov V.N. *Theoretical Foundations of Grinding Fibrous Materials in Knife Machines*: Dr. Eng. sci. Diss. Leningrad, 1990. 474 p.

3. *Зырянов М.А., Дресвянкин И.А., Рубинская А.В.* Экспериментально-теоретическое обоснование физико-химических превращений древесной биомассы в технологии производства древесноволокнистых плит // Инж. вестн. Дона. 2016. № 4. Режим доступа: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3841

Zyryanov M.A., Dresvyankin I.A., Rubinskaya A.V. Experimental and Theoretical Study of Physical and Chemical Transformations of Woody Biomass in the Production Technology of Fibreboard. *Inženernyj vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2016, no. 4.

4. *Зырянов М.А., Чистова Н.Г., Лазарева Л.И.* Совершенствование работы размольного участка производства древесно-волокнистых плит мокрым способом // Химия растительного сырья. 2011. № 3. С. 193–196.

Zyryanov M.A., Chistova N.G., Lazareva L.I. Improving the Work of the Grinding Site for the Production of Fiberboard by the Wet Method. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2011, no. 3, pp. 193–196.

5. *Зырянов М.А., Чистова Н.Г., Швецов В.А., Зарипов З.З.* Переработка древесных отходов в производстве древесно-волокнистых плит // Вестн. КрасГАУ. 2010. № 4. С. 288–291.

Zyryanov M.A., Chistova N.G., Shvetsov V.A., Zaripov Z.Z. Wood Waste Processing for the Wood-Fiber Panels Production. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2010, no. 4, pp. 288–291.

6. *Коротаев Э.И., Симонов В.И.* Производство строительных материалов из древесных отходов. М.: Лесн. пром-сть, 1972. 144 с.

Korotayev E.I., Simonov V.I. *Production of Building Materials from Wood Waste*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1972. 144 p.

7. *Мохирев А.П., Аксенов Н.В., Шеверев О.В.* О рациональном природопользовании и эксплуатации ресурсов в Красноярском крае // Инж. вестн. Дона. 2014. № 4-1. Режим доступа: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2569

Mokhirev A.P., Aksenov N.V., Sheverev O.V. On the Rational Management and Exploitation of Resources in the Krasnoyarsk Region. *Inženernyj vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2014, no. 4-1.

8. *Никишов В.Д.* Комплексное использование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 264 с.

Nikishov V.D. *Integrated Use of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 264 p.

9. *Чистова Н.Г., Алашкевич Ю.Д.* Подготовка древесного волокна в производстве древесноволокнистых плит // Изв. вузов. Лесн. журн. 2009. № 4. С. 123–128.

Chistova N.G., Alashkevich Yu.D. Preparation of Wood Fiber for Fiberboard Production. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2009, no. 4, pp. 123–128. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/22b/22be9800bbc205d4ddd76006f1a62e21.pdf

10. Bens O., Hüttl R.F. Energetic Utilisation of Wood as Biochemical Energy Carrier – a Contribution to the Utilisation of Waste Energy and Landuse. *International Journal of Thermal Sciences*, 2001, vol. 40, iss. 4, pp. 344–351. DOI: https://doi.org/10.1016/S1290-0729(00)01220-5

11. Chornyy O. Influence of the Bretton Woods Institutions on Economic Growth: Literature Survey for Transitional Economic Systems. *Economics & Sociology*, 2011, vol. 4, no. 2, pp. 32–41. DOI: https://doi.org/10.14254/2071-789X.2011/4-2/4

12. Ferguson W. Wood Pulp Is Surprise New Wonder Material. *New Scientist*, 2012, vol. 215, iss. 2878, p. 24. DOI: https://doi.org/10.1016/S0262-4079(12)62122-8

13. *Forests and Forestry in Sweden*. Stockholm, Royal Swedish Academy of Agriculture and Forestry (KSLA), 2015. 24 p. Available at: https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/in-english/forests-and-forestry-in-sweden_2015.pdf (accessed 12.03.20).

14. Goldstein J. Finding New Markets for Local Waste Wood. *BioCycle*, 2002, vol. 43, no. 12, p. 30.

15. Hellen E. Beyond Paper and Board – Leap in Resource-Efficiency with Nanocellulose and New Forming Techniques. *Forestcluster Ltd's Annual Seminar*. Helsinki, 2011. 25 p.

16. Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mammatov V.O. Assessment of Availability of Wood Resources Using Geographic Information and Analytical Systems (the Krasnoyarsk Territory as a Case Study). *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 313–319. DOI: https://doi.org/10.5937/jaes16-16908

17. Shi S.Q., Gardner D., Pendleton D., Hoffard T. Timber Production from Reclaimed Creosote-Treated Wood Pilings: Economic Analysis and Quality Evaluation. *Forest Products Journal*, 2001, vol. 51, no. 11-12, pp. 45–50.

18. Wood Waste Reduction. *Pollution Prevention Institute*. Topeka, Kansas State University, 2006. 12 p.

19. Zozulya V.V., Romanchenko O.V., Zuykov A.V., Sergeeva A.Yu., Medvedev S.O., Zozulya I.V. Financial Stimulation of Forest Resources Deep Processing. *Journal of Advanced Research in Law and Economics*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 312–318.

20. Zozulya V.V., Sakhanov V.V., Medvedev S.O., Bezrukih Y.A., Romanchenko O.V. The Features of Industrial Modernization Management in Forest Complex. *Proceedings of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 17)*. Albena, SGEM, 2017, pp. 927–934.

EFFECT OF ADDITION OF CHOPPED NEEDLES ON THE FIBERBOARD QUALITY INDICATORS

Mikhail A. Zyryanov, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*
ResearcherID: N-6950-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4525-2124
Sergey O. Medvedev, *Candidate of Economics; ResearcherID: N-8240-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7459-3150*
Aleksandr P. Mokhirev, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*
ResearcherID: N-9961-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1692-3323
Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Pobedy, 29, Lesosibirsk, Krasnoyarsk Krai, 662543, Russian Federation; e-mail: zuryanov13@mail.ru, medvedev_serega@mail.ru, ale-mokhirev@yandex.ru

Abstract. Until recently, only the trunk of a tree was recognized as valuable in the forest industry, and everything else, including the crown, was considered waste. Logging wastes cluttered felling sites and created a favorable environment for habitation and reproduction of forest pests, as well as contributed to the emergence of forest fires. Today, wood greens are used as a raw material in the logging industry for the production of pellet fuels; in the wood-chemical complex for the manufacture of chlorophyll-carotene pastes, sodium chlorophyllin, and coniferous healing extract; in agro-industrial production to obtain coniferous vitamin flour. Analysis of literature sources showed that fibreboards are widely used in housing construction as structural, finishing, and insulating materials. The advantage of fibreboards is the ability to impart special properties to them, such as fire resistance, water resistance, biostability, soundproofing, and heat-insulating ability by adding various components to the fibreboard at the manufacturing stage. Studies of the effect of adding coniferous flour on the quality indicators and physical and mechanical parameters of the finished fiberboard have been carried out in order to solve the problem of expanding the raw material base for fiberboard production. The possibility of using this raw material in the form of coniferous flour in the production of fiberboard has been substantiated. The influence of the percentage of needle flour in the total volume of wood fiber pulp and particle size on the qualitative indicators of the material is shown. Statistical and mathematical equations and graphical dependencies have been obtained. They allow predicting the indicators of fiberboards for a given content and particle size of flour from coniferous greens. The optimal size of the particles of coniferous flour and its content in the fibreboard at which the values of physical and mechanical indicators of the finished product meet the requirements of the State Standard GOST 4598-86 are determined.
For citation: Zyryanov M.A., Medvedev S.O., Mokhirev A.P. Effect of Addition of Chopped Needles on the Fiberboard Quality Indicators. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 125–132. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-125-132
Funding: The research was funded by the grant of the President of the Russian Federation for young scientists – candidates of sciences MK-1902.2019.6. The project “Development and Implementation of an Effective Technology for Integrated Processing of Logging Waste” was supported by the Krasnoyarsk Regional Fund of Science.

Keywords: fiberboard, static bending strength, fibreboard density, wood greens, needles, wastes, fiber, logging residues.

Поступила 12.03.20 / Received on March 12, 2020

УДК 674.812
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-133-144

ВЛИЯНИЕ АЭРОСИЛА ТЕХНИЧЕСКОГО НА СВОЙСТВА КЛЕЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Е.Г. Соколова, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: ABE-3531-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9698-9321*
Д.С. Русаков, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: I-9245-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4344-2779*
Г.С. Варанкина, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: H-1922-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3470-5124*
А.Н. Чубинский, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: I-9432-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7914-8056*
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: nikitinaek@rambler.ru, dima-ru25@mail.ru, varagalina@yandex.ru, a.n.chubinsky@gmail.com

Аннотация. Основными факторами конкуренции продукции, произведенной с использованием клеевых композиций, являются токсичность готовых материалов, расход сырьевых и энергоресурсов, продолжительность основных технологических операций. Управлять этими факторами можно, применяя клеи с разным наполнением и/или модификацией. Клеи на основе фенолоформальдегидных и меламинокарбамидоформальдегидных смол используются для получения фанеры повышенной водостойкости. Кроме смол в состав клеев обычно вводят отвердители, наполнители и модификаторы, влияющие на свойства готовой продукции. Аэросил технический – один из модификаторов синтетических смол широкого спектра действия. Для него характерны 3 вида взаимодействия: физическая адсорбция, химическая адсорбция (образование водородных мостиков группами силанола) и химические реакции на поверхностном слое. Проанализирован химический состав аэросила. Особый интерес представляет алюминий фтористый технический (AlF_3), способный к взаимодействию с фторидами щелочных металлов с образованием комплексных соединений, улучшающих структурирование полимера. Кислоты, входящие в состав аэросила, снижают pH до 2,0–3,5, поэтому могут быть катализаторами процесса отверждения меламинокарбамидоформальдегидных смол. Выполнены исследования влияния аэросила технического на свойства клеевых систем на основе фенолоформальдегидной и меламинокарбамидоформальдегидной смол. Определены вязкость, время отверждения, смачивающая способность клеевых композиций. Полученные данные свидетельствуют о возможности применения данного модификатора в составе фенолоформальдегидных и меламинокарбамидоформальдегидных смол до 15 мас. ч. Установлен характер действия аэросила на клеевые композиции с помощью ИК-спектроскопии. Анализ результатов показал, что данное соединение способствует глубокому структурообразованию полимера за счет увеличения молекулярной массы молекул. Эти связи позволяют сформировать более структурированный полимер со связанным формальдегидом. Выполнены исследования влияния аэросила на свойства готовой продукции. При этом установлено улучшение эксплуатационных показателей: прочность склеивания увеличивается, токсичность фанеры уменьшается. Результаты экспериментов влияния аэросила технического с учетом сокращения времени склеивания могут быть применены при разработке технологических процессов получения фанеры повышенной водостойкости.

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

Для цитирования: Соколова Е.Г., Русаков Д.С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Влияние аэросила технического на свойства клеевых композиций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 133–144. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-133-144

Ключевые слова: фанера, фенолоформальдегидная смола, меламинокарбамидоформальдегидная смола, модификация, аэросил технический, свойства клеев, ИК-спектроскопия, режимы склеивания шпона, прочность продукции, токсичность продукции.

Введение

Продукция, произведенная с использованием клеевых композиций, может конкурировать на рынке, учитывая основные сдерживающие факторы: токсичность готовых материалов, расход сырьевых и энергоресурсов, продолжительность технологических операций. С помощью наполнения и/или модификации возможно управлять этими факторами [1–4, 8–24].

Основными компонентами клеев, применяемых для склеивания шпона, являются карбамидоформальдегидные, фенолоформальдегидные, реже меламиноформальдегидные смолы. При использовании карбамидоформальдегидных смол сложно получить фанеру высокой прочности и водостойкости. Клеи на основе фенолоформальдегидных смол, повышающие водостойкость материала, отличаются высокой себестоимостью. Меламинокарбамидоформальдегидные смолы в этой ситуации являются компромиссным решением [12, 15, 16]. Кроме смол в состав клеев обычно вводят отвердители, наполнители и модификаторы, влияющие на свойства готовой продукции [1–4, 8–31]. Аэросил технический – один из модификаторов синтетических смол широкого спектра действия [3]. Модификация клеев, изменяющая их свойства, характер отверждения и физико-химические показатели готовой продукции, требует детального изучения.

Цель исследования – обоснование влияния аэросила технического в составе клеевых систем на основе фенолоформальдегидных и меламинокарбамидоформальдегидных смол на эксплуатационные характеристики фанеры.

Объекты и методы исследования

Основными материалами для проведения исследований были выбраны березовый шпон толщиной 1,5 мм, аэросил технический, фенолоформальдегидная и меламинокарбамидоформальдегидная смолы.

В табл. 1 приведен химический состав аэросила [3].

Таблица 1

Химические соединения, входящие в состав аэросила

Соединение	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	Na_2O	As	B_2O_3	Bi_2O_3	P_2O_5	HCl
Содержание, %	>99,8700	<0,0500	<0,0030	<0,0300	<0,0009	<0,0001	<0,0030	<0,0003	<0,0005	<0,0250

Анализ с применением электронной сканирующей микроскопии позволяет предположить, что частицы аэросила технического имеют несколько слоев (рис. 1, 2).

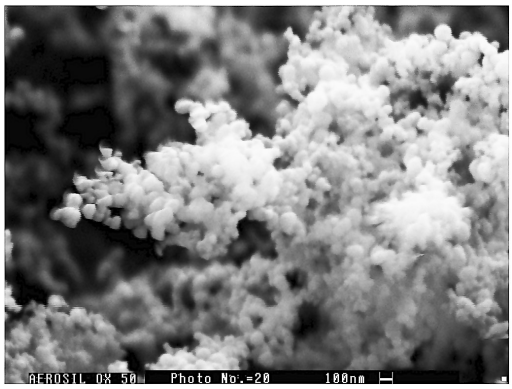


Рис. 1. Микрофотография аэросила технического (увеличение в 25 000 раз)

Fig. 1. Micrograph of technical aerosil (25,000x magnification)

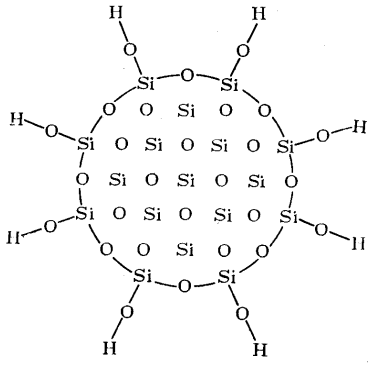


Рис. 2. Структурная схема частицы аэросила технического

Fig. 2. Schematic diagram of a technical aerosil particle

Внутренний слой – это ядро, представленное химическим соединением SiO_2. За счет функциональных силановых (Si-OH) и силоксановых (Si-O-Si) групп на внешнем слое аэросил создает узорчатый каркас водородных связей. Полярность обусловлена связью кремний–кислород, которая характеризуется высокой энергией (до 372,5 Дж/моль). На внешнем слое поверхностные силаноловые группы могут быть свободными или соединенными водородными мостиками, при этом они расположены в хаотичном порядке. Силановые группы гидрофобны, стабильны (OH -силаноловой группы отщепляются при температуре более 300 °С). На поверхностном уровне происходит чередование атомов кремния с гидроксильной группой и без нее. Благодаря этому для аэросила характерны 3 вида взаимодействия: физическая адсорбция, химическая адсорбция (образование водородных мостиков группами силанола) и химические реакции на поверхностном слое.

Диоксид кремния обладает хорошими сорбционными качествами, возможно поглощение от 15 до 60 % веществ разной природы за счет химической (водородные мостики) и физической адсорбции.

Анализируя химический состав аэросила, особое внимание следует уделить алюминию фтористому техническому (AlF_3), способному к взаимодействию с фторидами щелочных металлов с образованием комплексных соединений, улучшающих структурирование полимера. Кислоты, входящие в состав аэросила, снижают pH до 2,0–3,5, поэтому могут быть катализаторами процесса отверждения меламинокарбамидоформальдегидных смол.

Определение физико-химических показателей клеевых композиций проводили с использованием ГОСТ 20501–2015 [7]. По ГОСТ 9624–2009 испытывали готовый материал по прочностным характеристикам [5]. Исследование влияния аэросила технического на эксплуатационные показатели продукции

осуществляли методом ИК-спектроскопии, брали результаты оценки изменения интенсивности полос поглощения и наличия смещений их максимумов.

С целью установления токсичности готовой продукции определяли содержание свободного формальдегида перфораторным методом по ГОСТ 27678–2014 [6].

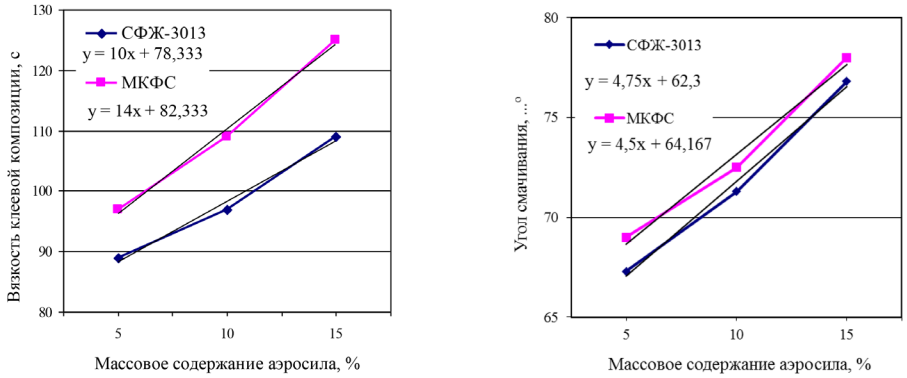
Результаты исследования и их обсуждение

Эксперименты позволили установить влияние аэросила технического на свойства клеевых композиций (табл. 2, рис. 3).

Таблица 2

Влияние аэросила на показатели клеевых композиций

Состав клеевой композиции	Жизнеспособность клеевой композиции, ч	Время отверждения, с
СФЖ-3013 – 100 мас. ч.	–	580
СФЖ-3013 – 100 мас. ч. Аэросил – 5…15 мас. ч.	8–10	560–470
МКФС – 100 мас. ч. Хлористый аммоний – 1,5 мас. ч.	6–8	98
МКФС – 100 мас. ч. Хлористый аммоний – 1,5 мас. ч. Аэросил – 5…15 мас. ч.	6–8	92–65



а *б*

Рис. 3. Влияние аэросила технического на вязкость (*а*) и смачивающую способность (*б*) клеевой композиции

Fig. 3. Effect of technical aerosil on the viscosity (*а*) and wetting ability (*б*) of the adhesive composition

Вязкость клея оказывает существенное влияние на его смачивающую способность, равномерность нанесения, расход компонентов. При введении в клей аэросила технического этот показатель возрастает, сокращается время отверждения клея, обеспечивается более плотный клеевой шов с малыми усадочными напряжениями. Но с увеличением вязкости становится больше расход клея, что приводит к удорожанию готовой продукции.

Смачивающая способность определяется глубиной конденсации полимера. Клей с низкой вязкостью глубже проникает в полости древесины, возникают пустоты в клеевом слое, что также ведет к снижению прочности склеивания, одному из основных показателей клеевых соединений.

С помощью ИК-спектроскопии был установлен характер действия модификатора на клеевую композицию. В ее состав вводили аэросил технический в количестве 10 % (рис. 4, 5).

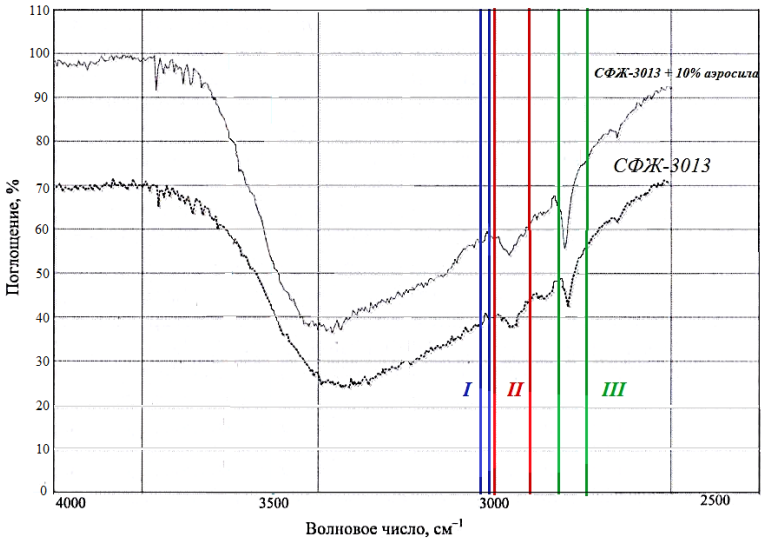
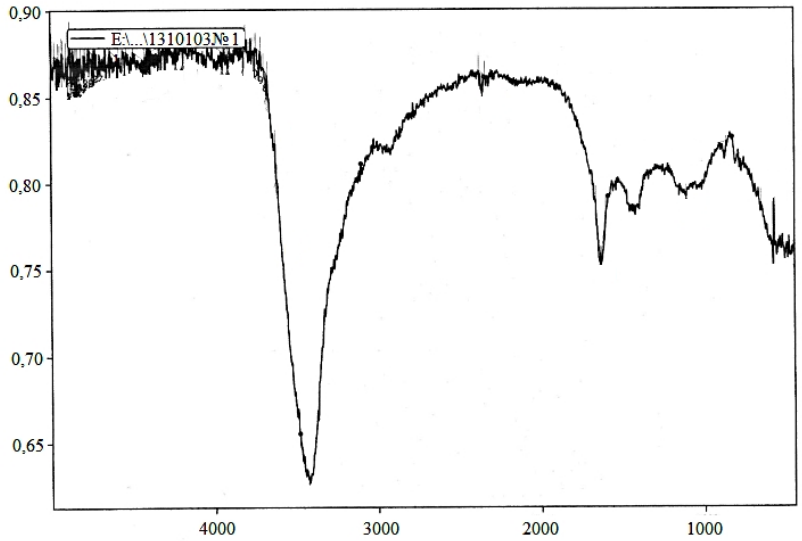


Рис. 4. ИК-спектрограммы фенолоформальдегидной смолы без аэросила технического и фенолоформальдегидной смолы + 10 % аэросила технического

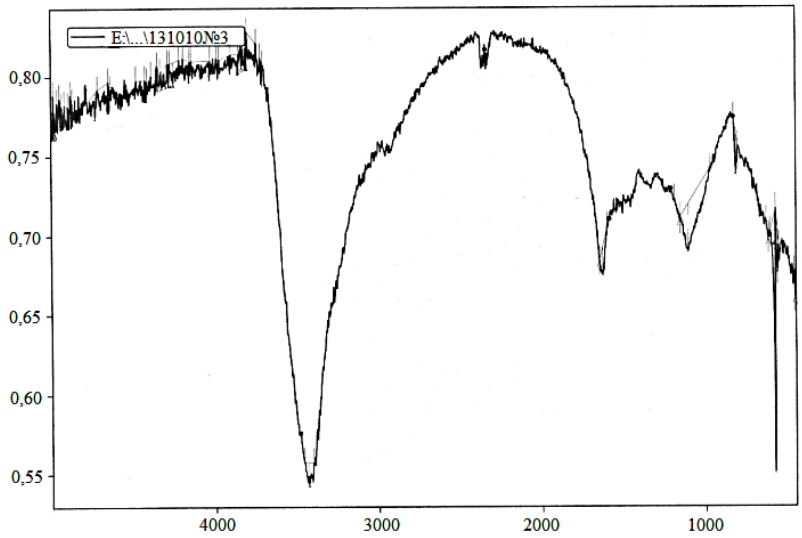
Fig. 4. IR spectrograms of phenol-formaldehyde resin without technical aerosil and phenol-formaldehyde resin + 10 % technical aerosil

Полоса 3008…3030 см$^{-1}$ (I), отнесенная к валентным колебаниям простой эфирной связи, свидетельствует об увеличении скорости и глубины процесса отверждения клея. Подтверждением образования метилольных групп является появление полос в области 2750…2850 см$^{-1}$ (III), изменение числа и положения связей в области 2870…2970 см$^{-1}$ (II), что говорит о повышении степени отверждения связующего. Изученные изменения показывают возможность ускорения процесса отверждения клеевой композиции на основе фенолоформальдегидной смолы, а следовательно, и углубления степени отверждения.

Сравнение полученных спектрограмм позволяет пронаблюдать смещение максимума с 1400–1000 см$^{-1}$ C-F до более узких интервалов 1100–1105 см$^{-1}$ al CF_2. Это способствует росту энергии связи молекул на 5,28×10^3 Дж/моль с возможностью увеличения когезионной прочности клеевого слоя. Появление нового максимума в области спектра 1100–1105 см$^{-1}$ свидетельствует о более глубоком структурообразовании за счет повышения молекулярной массы полимера. Отмеченное подтверждает возможность увеличения прочностных показателей готовой продукции за счет влияния аэросила технического.



а



б

Рис. 5. ИК-спектрограммы смолы марки МКФС: *а* – без аэросила технического; *б* – 10 % аэросила технического

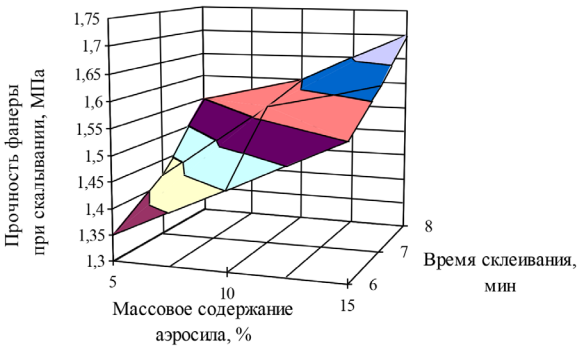
Fig. 5. IR spectrograms of MKFS resin: *a* – without technical aerosil; *б* – with 10 % technical aerosil

Дальнейшие эксперименты были направлены на определение влияния аэросила на эксплуатационные показатели готовой продукции. Для этого изготавливались экспериментальные образцы фанеры, которые испытывались на прочность и изучались с точки зрения содержания в них свободного формальдегида. Технологические параметры склеивания фанеры приведены в табл. 3. Показатели прочности и эмиссии формальдегида представлены на рис. 6, 7.

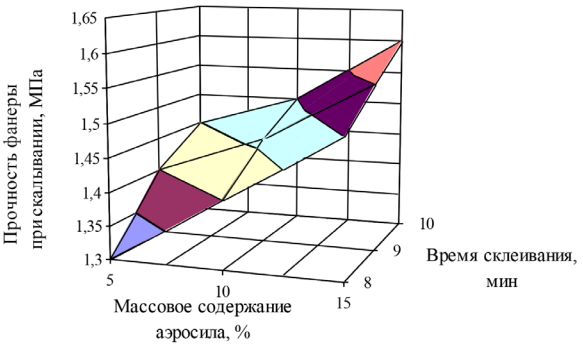
Таблица 3

Технологические параметры склеивания 3-слойной фанеры

Состав клеевой композиции	Расход клеевой композиции, г/м^2	Давление прессования, МПа	Температура плит пресса, ºС	Время склеивания, мин
СФЖ-3013 – 100 мас. ч. Аэросил – 5…15 мас. ч.	120–130	1,6–1,8	120	10
				9
				8
МКФС – 100 мас. ч. Аэросил – 5…15 мас. ч. Хлористый аммоний – 1,0 мас. ч.	120–130	1,6–1,8	120	6
				7
				8



а



б

Рис. 6. Влияние аэросила на время склеивания и прочность фанеры на основе фенолоформальдегидной (*а*) и меламинокарбамидоформальдегидной (*б*) смол

Fig. 6. Effect of aerosil on the bonding time and strength of plywood based on phenol-formaldehyde (*a*) and melamine-urea-formaldehyde (*b*) resins

Уравнения регрессии, характеризующие влияние аэросила на прочностные показатели фанеры, изготовленной с применением клеевой композиции на основе фенолоформальдегидной (1) и меламинокарбамидоформальдегидной (2) смол, представлены ниже:

$$\sigma^{скал} = 0{,}673 + 0{,}067t + 0{,}018n, \quad (1)$$

при 8 мин $\leq t \leq$ 10 мин;

$$\sigma^{скал} = 0{,}78 + 0{,}082t + 0{,}082n, \quad (2)$$

при 8 мин $\leq t \leq$ 6 мин,

где $\sigma^{скал}$ – прочность фанеры при скалывании, МПа; t – время склеивания, мин; n – массовое содержание аэросила в клеевой системе, %.

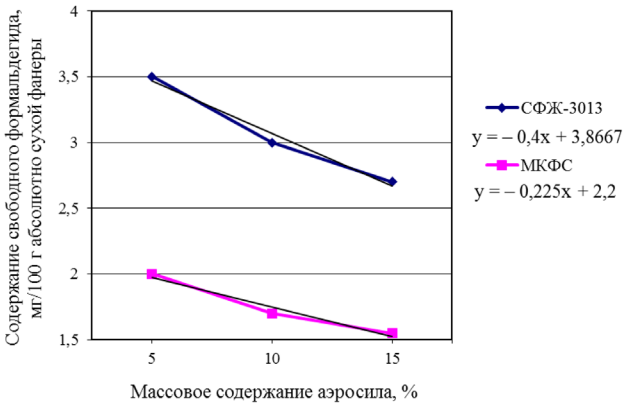


Рис. 7. Влияние аэросила технического на содержание свободного формальдегида в готовой продукции

Fig. 7. Effect of technical aerosil on the content of free formaldehyde in finished products

Аэросил технический оказывает положительное влияние на показатели прочности и токсичности фанеры, улучшает ее эксплуатационные характеристики. Можно предположить, что склеивание при высокой температуре (табл. 3) ведет к разрушению диметиленовых связей в клеевой композиции на основе меламинокарбамидоформальдегидной смолы и образованию метиленовых связей. Данные связи позволяют сформировать более структурированный полимер со связанным формальдегидом. Кроме того, силоксановые (Si-O-Si) группы образуют разветвленные цепочки, что также способствует структурообразованию.

Заключение

Установлено влияние аэросила технического на технологические и эксплуатационные показатели клеевых композиций. Полученные результаты свидетельствуют о возможности его применения в составе фенолоформальдегидных и меламинокарбамидоформальдегидных смол до 15 мас. ч. от общей массы. Введение аэросила более 15 мас. ч. в состав клеевых композиций нецелесообразно с точки зрения нарастания вязкости и увеличения расхода клеевой композиции для обеспечения равномерного нанесения при сборке пакетов шпона. При этом доказано улучшение эксплуатационных показателей готовой продукции: прочность склеивания увеличивается, токсичность уменьшается, водопоглощение возрастает незначительно. Результаты исследования влияния аэросила технического на технологические и эксплуатационные свойства материалов могут быть использованы при разработке методов склеивания шпона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Анисимов М.В.* Цеолитный наполнитель, активированный в электромагнитных полях, для производства фанеры // Лесотехн. журн. 2013. № 4. С. 94–102.

Anisimov M.V. Zeolite Filler, Activated in Electromagnetic Fields for the Production of Plywood. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2013, no. 4, pp. 94–102. DOI: https://doi.org/10.12737/2186

2. *Варанкина Г.С., Чубинский А.Н., Брутян К.Г.* Модифицированные карбамидоформальдегидные и фенолоформальдегидные клеи для древесно-стружечных плит и фанеры // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. № 6. С. 12–14.

Varankina G.S., Chubinskiy A.N., Brutyan K.G. Modified Urea-Formaldehyde and Phenol-Formaldehyde Adhesives for Wood Chipboards and Plywood. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2017, no. 6, pp. 12–14.

3. *Варанкина Г.С., Русаков Д.С., Соколова Е.Г., Чубинский А.Н.* Исследование порошкообразных фенолоформальдегидных смол для изготовления фанеры // Изв. СПбЛТА. 2020. Вып. 231. С. 151–166.

Varankina G.S., Rusakov D.S., Sokolova E.G., Chubinsky A.N. The Study of Powdered Phenol-Formaldehyde Resins for the Manufacture of Plywood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2020, iss. 231, pp. 151–166. DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.231.151-166

4. *Глебов М.П., Брутян К.Г.* Анализ природных минеральных модификаторов для клеящих смол // Первичная обработка древесины. Лесопиление и сушка пиломатериалов. Состояние и перспективы развития. СПб.: СПбГЛТА, 2007. С. 28–33.

Glebov M.P., Brutyan K.G. Analysis of Natural Mineral Modifiers for Adhesive Resins. *Primary Wood Processing. Sawmilling and Drying of Timber. State and Prospects for Development*. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2007, pp. 28–33.

5. ГОСТ 9624–2009. Древесина слоистая клееная. Метод определения предела прочности при скалывании. Дата введения: 2011–01–01. М.: Стандартинформ, 2010. 11 с.

State Standard. GOST 9624–2009. Laminated Glued Wood. Method for Determination of Shear Strength. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 11 p.

6. ГОСТ 27678–2014. Плиты древесные и фанера. Перфораторный метод определения содержания формальдегида. Дата введения: 2016–01–01. М.: Стандартинформ, 2015. 9 с.

State Standard. GOST 27678–2014. Wood-Based Panels and Plywood. Perforator Method for Determination of Formaldehyde Content. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 9 p.

7. ГОСТ 20501–2015. Клеи для древесины. Метод определения технологических характеристик. Доступ из системы нормативов NormaCS.

State Standard. GOST 20501–2015. Glues for Wood. Methods for Determination of Technological Characteristics.

8. *Дейнеко И.П.* Утилизация лигнинов: достижения, проблемы и перспективы // Химия растительного сырья. 2012. № 1. С. 5–20.

Deineko I.P. Utilization of Lignins: Achievements, Problems and Prospects. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2012, no. 1, pp. 5–20.

9. *Доронин Ю.Г., Мирошниченко С.Н., Свиткина М.М.* Синтетические смолы в деревообработке: [справ.]. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 220 с.

Doronin Yu.G., Miroshnichenko S.N., Svitkina M.M. *Synthetic Resins in Woodworking*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 220 p.

10. *Жук П.М.* Анализ способов снижения эмиссии формальдегида из древесных плит // Междунар. науч.-исслед. журн. 2017. № 11(65), ч. 4. С. 36–40.

Zhuk P.M. Analysis of Methods of Reducing Formaldehyde Emission from Wood Boards. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2017, no. 11(65), part 4, pp. 36–40. DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.65.117

11. *Казакевич Т.Н.* Склеивание хвойного шпона при пониженных температурах: автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб., 1998. 20 с.

Kazakevich T.N. *Gluing of Coniferous Veneer at Low Temperatures*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Saint Petersburg, 1998. 20 p.

12. *Кондратьев В.П., Кондращенко В.И.* Синтетические клеи для древесных материалов. М.: Науч. мир, 2004. 520 с.

Kondratyev V.P., Kondrashchenko V.I. Synthetic Adhesives for Wood-Based Materials. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2004. 520 p.

13. *Кондратьев В.П., Чубов А.Б., Соколова Е.Г.* Совершенствование эксплуатационных свойств и технологии фанеры повышенной водостойкости // Изв. СПбЛТА. 2011. Вып. 194. С. 114–120.

Kondratiev V.P., Chubov A.B., Sokolova E.G. The Improvement of Application Properties and Technology of Increased Waterresistance Plywood. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2011, iss. 194, pp. 114–120.

14. *Плотникова Г.П., Плотников Н.П.* Модификация карбамидоформальдегидных связующих для производства ДСтП // Сб. науч. тр. SWORLD Т. 44, № 3. Одесса, 2013. С. 88–90.

Plotnikova G.P., Plotnikov N.P. Modification of Urea-Formaldehyde Binders for the Production of Wood Particle Board. *Collection of Academic Papers SWORLD*. Odessa, Nauchnyy mir Publ., 2013, vol. 44, no. 3, pp. 88–90

15. *Соколова Е.Г.* Модификация фенолоформальдегидной смолы меламинокарбамидоформальдегидной смолой для склеивания фанеры // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2(38) С. 111–115.

Sokolova E.G. Modification of Phenol-Formaldehyde Resin with Melamine-Carbamide-Formaldehyde Resin for Bonding Plywood. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 2(38), pp. 111–115. DOI: https://doi.org/10.18324/2077-5415-2018-2-111-115

16. *Соколова Е.Г., Русаков Д.С., Чубинский А.Н., Варанкина Г.С., Угрюмов С.А.* Оценка эксплуатационных свойств модифицированных синтетических смол и клееной фанеры на их основе // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 9. С. 10–15.

Sokolova E.G., Rusakov D.S., Chubinskiy A.N., Varankina G.S., Ugryumov S.A. Estimation of Service Properties of Modified Synthetic Resins and Plywood Based on Them. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2020, no. 9, pp. 10–15. DOI: https://doi.org/10.31044/1813-7008-2020-0-9-10-15

17. Справочник фанерщика / под ред. А.В. Волкова, А.Т. Орлова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2010. 486 с.

Plywood Manufacturer's Guide. Ed. by A.V. Volkov, A.T. Orlov. Saint Petersburg, Polytechnic University Publ., 2010. 486 p.

18. *Угрюмов С.А*. Структура и свойства фенолоформальдегидных смол, модифицированных фурфурол-ацетоновым мономером, применительно к производству плитных древесных материалов // Древесные плиты: теория и практика. Материалы XX Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: С.-Петерб. политехн. ун-т Петра Великого, 2017. С. 48–52.

Ugryumov S.A. Structure and Properties of Phenol-Formaldehyde Resins Modified with Furfural-Acetone Monomer as Applied to the Production of Wood-Based Panel Materials. *Wood Boards: Theory and Practice. Proceedings of the 20th International Scientific and Practical Conference*. Saint Petersburg, SPbPU Publ., 2017, pp. 48–52.

19. *Угрюмов С.А., Свиридов А.В., Федотов А.А.* Исследование свойств модифицированного феноло-формальдегидного олигомера методом ИК-спектроскопии // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. № 12. С. 26–28.

Ugryumov S.A., Sviridov A.V., Fedotov A.A. Study of Modified Phenol-Formaldehyde Oligomer Properties by IR-Spectroscopy Method. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2017, no. 12, pp. 26–28.

20. *Федотов А.А., Угрюмов С.А.* Исследование водостойкости древесно-стружечных плит на основе модифицированных фенолформальдегидных олигомеров // Науч. тр. молодых ученых КГТУ. Вып. 15. Кострома: КГТУ, 2014. С. 45–49.

Fedotov A.A., Ugryumov S.A. Study of Water Resistance of Particle Boards Based on Modified Phenol-Formaldehyde Oligomers. *Academic Papers of Young Scientists of KSTU.* Kostroma, KSTU Publ., 2014, iss. 15, pp. 45–49.

21. *Цветков В.Е., Якунькин А.А.* Синтез и свойства карбамидоформальдегидных смол, модифицированных солями органических кислот // Технология и оборудование для переработки древесины. Вып. 335. М.: МГУЛ, 2006. С. 220–223.

Tsvetkov V.E., Yakun'kin A.A. Synthesis, and Properties of Urea-Formaldehyde Resins Modified with Organic Acid Salts. *Technology and Equipment for Wood Processing*. Moscow, MGUL Publ., 2006, iss. 335, pp. 220–223.

22. *Чубинский А.Н., Казакевич Т.Н.* Склеивание хвойной фанеры при пониженных температурах // Деревообраб. пром-сть. 1992. № 4. С. 4–5.

Chubinskiy A.N., Kazakevich T.N. Gluing of Coniferous Plywood at Low Temperatures. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*, 1992, no. 4, pp. 4–5.

23. Osetrov A.V., Ugryumov S.A. Assessment of Activation Energy of Modified Phenol-Formaldehyde Resin. *Polymer Science, Series D*, 2016, vol. 9, iss. 1, pp. 31–32. DOI: https://doi.org/10.1134/S1995421216010160

24. Ugryumov S.A. A Study of the Viscosity of Phenol–Formaldehyde Resin Modified with Furfural–Acetone Monomer FA. *Polymer Science, Series D*, 2017, vol. 10, iss. 2, pp. 99–102. DOI: https://doi.org/10.1134/S199542121702023X

25. Ugryumov S.A., Tsvetkov V.E. Enhancement of Service Characteristics of Boon Boards by Modifying Carbamide-Formaldehyde Binder with Poly(Vinyl Acetate) Dispersion. *Polymer Science, Series D*, 2008, vol. 1, iss. 4, pp. 241–243. DOI: https://doi.org/10.1134/S1995421208040059

26. Ugryumov S.A., Sviridov A.V., Fedotov A.A. Investigation of the Properties of Modified Phenol-Formaldehyde Oligomer Using IR Spectroscopy. *Polymer Science, Series D*, 2018, vol. 11, iss. 3, pp. 277–279. DOI: https://doi.org/10.1134/S1995421218030206

27. Uguina M.A., Sotelo J.L., Serrano D.P. Roles of ZSM-5 Modifier Agents in Selective Toluene Disproportionation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1993, vol. 71, iss. 4, pp. 558–563. DOI: https://doi.org/10.1002/cjce.5450710408

28. Vick C.B. Phenolic Adhesive Bonds to Aspen Veneers Treated with Amino-Resin Fire Retardants. *Forest Products Journal*, 1994, vol. 44, no. 1, pp. 33–40.

29. Vick C.B. Coupling Agent Improves Durability of PRF Bonds to CCA-Treated Southern Pine. *Forest Products Journal*, 1995, vol. 45, no. 3, pp. 78–84.

30. Weiland J.J., Guyonnet R. Study of Chemical Modifications and Fungi Degradation of Thermally Modified Wood Using DRIFT Spectroscopy. *Holz als Roh- und Werkstoff* [European Journal of Wood and Wood Products], 2003, vol. 61, iss. 3, pp. 216–220. DOI: https://doi.org/10.1007/s00107-003-0364-y

31. Wotten A.L., Sellers T., Tahir P.M. Reaction of Formaldehyde with Lignin. *Forest Products Journal*, 1988, vol. 38, no. 6, pp. 45–46.

EFFECT OF TECHNICAL AEROSIL ON THE PROPERTIES OF ADHESIVE COMPOSITIONS

Ekaterina G. Sokolova, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*
ResearcherID: ABE-3531-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9698-9321
Dmitry S. Rusakov, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: I-9245-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4344-2779*

Galina S. Varankina, *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: H-1922-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3470-5124*
Anatoly N. Chubinsky, *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: I-9432-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7914-8056*
Saint Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: nikitinaek@rambler.ru, dima-ru25@mail.ru, varagalina@yandex.ru, a.n.chubinsky@gmail.com

Abstract. The main drivers of competition among the products made with the use of adhesive compositions are the toxicity of finished products, the consumption of raw materials and energy resources, the duration of the main technological operations. These drivers can be controlled by using adhesives with different fillings and/or modifications. Adhesives based on phenol-formaldehyde and melamine-urea-formaldehyde resins are used to produce plywood with increased water resistance. Apart from resins, adhesives usually contain hardeners, fillers, and modifiers that affect the properties of the finished product. Technical aerosol is one of the modifiers of synthetic resins with a wide range of action. Aerosil is characterized by three types of interaction: physical adsorption, chemical adsorption (formation of hydrogen bridges by silanol groups), and chemical reactions on the surface layer. The chemical composition of aerosil was analyzed. Technical aluminum fluoride (AlF_3) is of particular interest. It can interact with alkali metal fluorides with the formation of complex compounds that improve polymer structuring. The acids that make up aerosil reduce the pH to 2.0–3.5, so they can be catalysts for the curing process of melamine-urea-formaldehyde resins. The effect of technical aerosil on the properties of adhesive systems based on phenol-formaldehyde and melamine-urea-formaldehyde resins has been studied. Viscosity, curing time, and wetting ability of adhesive compositions were determined. The obtained results indicate the possibility of using this modifier in the composition of phenol-formaldehyde and melamine-urea-formaldehyde resins up to 15 pts. wt. The nature of the aerosil action on adhesive compositions was determined using IR spectroscopy. Analysis of the results showed that aerosil promotes deep structure formation of the polymer by increasing the molecular weight of the molecules. These bonds make it possible to form a more structured polymer with bound formaldehyde. Studies of the effect of aerosil on the properties of finished products were carried out. At the same time, an increase in performance indicators was found: the strength of adhesion increases, the toxicity of plywood decreases. The results of experiments on the effect of technical aerosil, taking into account the reduction of bonding time can be applied in the development of technological processes for obtaining plywood of high water resistance.
For citation: Sokolova E.G., Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinsky A.N. Effect of Technical Aerosil on the Properties of Adhesive Compositions. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 133–144. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-133-144

Keywords: plywood, phenol-formaldehyde resin, melamine-urea-formaldehyde resin, modification, technical aerosil, properties of adhesives, IR spectroscopy, veneer gluing modes, strength of products, toxicity of products.

Поступила 10.04.20 / Received on April 10, 2020

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 631.542.3:543.641
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-145-160

PRUNING INFLUENCE ON CHEMICAL COMPOSITION OF SPRUCE WOOD (*Picea abies* (L.) Karst.)

Andrey V. Pranovich*[1,2]*, Candidate of Chemistry, Senior Research Scientist, Assoc. Prof.;
ResearcherID: H-4533-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3615-8582
Oleg I. Antonov*[3,2]*, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof., Leading Research Scientist;
ResearcherID: H-1480-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2869-9234
Alexander A. Dobrovolsky*[2]*, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.;
ResearcherID: ABF-7706-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6816-4912
[1]Åbo Akademi University, Porthansgatan 3, Turku/Åbo, FI-20500, Finland;
e-mail: apranovi@abo.fi
[2]Saint Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: alexander-83@yandex.ru
[3]Saint Petersburg Forestry Research Institute, Institutskiy prosp., 21, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: woodfm@mail.ru

Abstract. The aim of the work was to investigate the influence of pruning on wood composition in different morphological parts of the Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) trees, including heartwood and sapwood compared to normal trees as a reference. Pruning intensity during that treatment was 35–41 % of the total length of the crown for the trees with the average and less than average diameter at breast height and 28 % for the trees with diameter at breast height higher than the average. Components composition of acetone soluble extractives was analysed by gas chromatography with long and short columns, and their molar mass distribution was analysed by gel permeation chromatography. The following was determined in the pre-extracted wood tissues: cellulose (acid hydrolysis – gas chromatography); lignin (Acetyl Bromide method) and hemicellulose and pectins composition (acid methanolysis – gas chromatography). Acetone-soluble wood extractives are a complex mixture of different groups of organic compounds, i.e. both lipophilic and polar substances. The high-performance gel permeation chromatography analysis revealed the dominance of triglycerides, steryl esters, fatty and resin acids in the obtained extracts. The amount of monosaccharides in the extracts was also substantial. The chemical composition of wood tissues of the reference and pruned trees was almost similar. Compared to the reference trees, the wood samples of the pruned trees showed increased amounts of resin acids in sapwood, high amounts of lignin and double amounts of fructose in both sapwood and heartwood. The analysis results can be explained by response of trees to their pruning as a defense mechanism against plant pathogens and must be a result of the current physiological activity of those trees, possibly related to differences in crown sizes.
For citation: Pranovich A.V., Antonov O.I., Dobrovolsky A.A. Pruning Influence on Chemical Composition of Spruce Wood (*Picea abies* (L.) Karst.). *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 145–160. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-145-160

Keywords: pruning, *Picea abies*, chemical composition of spruce wood, extractives, cellulose, lignin, hemicelluloses, GC, GPC.

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

Introduction

Increasing forest productivity and improving wood quality is one of the priorities in silviculture. It is obvious, that the intensification of silviculture is essential to increase forestry profitability.

One of the main criteria of successful operation of timber industry segments (timber, furniture, pulp and paper production, etc.) is the quality of wood raw material. Such indicators as knot presence, wood density, and fiber length affect the quality of the final product and its production cost.

The most effective way to improve the quality of grown wood is pruning, which is not widely spread in Russian silviculture nowadays. If branches are removed in due time and this procedure is carried out in conjunction with thinning and fertilization (as a rule, at the stage of commercial thinnings), the amount of high-quality knot-free wood increases resulting in higher volumes of the best varieties of sawn timber and merchantable assortments (e.g. resonant, aviation, etc.) as well as plywood veneer as a result of peeling [1].

Pruning increases trunk quality; improves the aesthetic appearance of stands and individual trees in landscape design; decreases the class of fire danger for stands; increases the resistance of stands to windfalls, snowstorms, entomo- and phyto-pests. It was found out that the cost of trimming branches on growing spruce trees and cutting off branches during logging is practically the same [3]. Thus, it means that this operation should be carried out in an earlier period (40–50 yrs prior to the final felling).

This method of improving the quality of produced wood is known from ancient times [2, 5]. In the history of Russian forestry, the first experiments on the cultivation of trees with valuable timber were carried out in the middle of the 18th century on the territory, which currently belongs to the Republics of Chuvashia, Mari El and Tatarstan. The work was carried out in oak forests (stands designed for producing timber for shipbuilding) under the guidance of foremen M. Zelcher and I. Valentine (students of the famous forester F.G. Fokel). Over 100,000 trees were treated [2]. This silvicultural technique did not become widely used in Russia and was conducted only for experimental purposes.

Currently pruning is considered to be obligatory in silvicultural treatment as it increases the profitability of capital investments [7] and it is used in highly-developed countries [6, 12, 16, 19, 22, 23].

In Finland, for example, this operation is carried out annually in the area of 2,000–4,000 ha and its estimated cost is about two mln euros. Between 1983 and 2013 166,400 ha were treated by pruning [15]. It is known that the tree crown of coniferous species is the physiological center that controls the process of wood formation inside the trunk [4]. Therefore, controlling the crown parameters by removing the lower dry and live branches without leading to depression in the growth of the tree makes it possible to grow wood with a homogeneous, knot-free structure, which increases its acoustic, physical and mechanical properties.

However, we still do not know how deep changes in the physiology of wood formation from the chemical point of view are, i.e. what the chemical composition of coniferous species after pruning is.

The aim of the work was to investigate the influence of pruning on spruce wood composition in different morphological parts of the tree, including heartwood and sapwood compared to normal trees as a reference.

Materials and methods

Origin of the research object. The studies were carried out in the stands of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), created in 1956 in the Taitsky forest sub-district of the Gatchina forest district (compart. 28, allot. 2) of the Leningrad Region, Russia. These experimental stands were planted on the territory, where the original trees were harvested in 1940, and then it was naturally afforested by low-value deciduous species (mainly aspen and partly alder, and birch) until the experimental plot was founded there in 1956; the canopy density at the area is 0.6. The stands are located on flat terrain with loamy and moist soil. The ground cover: *Aegopodium podagraria*, *Geranium pratense*, *Convallaria majalis*, *Oxalis acetosella*. Forest type – *Picea abies-Oxalis acetosella*, site index/bonitet – I-Ia.

In 1985 the laboratory of forest plantations of the Saint-Petersburg Research Institute of Forestry (SPbNIILKh) established permanent experimental plots (PEP) No. 157, 158, 159, and 160 (reference plot) in order to test the technology of growing high-quality wood with different density of stands. The trees of all the growth classes were single-pruned up to the height of 7.5 m.

Pruning intensity during that treatment was 35–41 % of the total length of the crown for the trees with the average and less than the average diameter at breast height (DBH) and 28 % for the trees with DBH higher than the average. The branches were removed with handsaws (up to the height of 2.0 m) and with a device, designed by LenNIIILH (previous name of SPbNIILKh). The pruning period was from July to October 1985. The cuts were made without damaging the bark, flush with the surface of the trunk. The stand enumeration at all the PEPs was carried out every five years, starting with the 29-year-old ones.

At present, these permanent plots are highly productive plantations of considerable scientific value (fig. 1).

Fig. 1. Trees with their branches pruned up to 7.5 m, the Taitsky forest sub-district of the Gatchina forest district, compart. 28, 2016

Characteristics of the research object. The trees of a large-size category were analysed in this study: six trees with pruned branches and six reference trees.

Preparation of wood samples for analysis. The wood samples were the kerns taken with an age borer from each tree at the altitude of 1.3 m from the soil level. They were immediately frozen and stored in the dark in hermetically sealed plastic bags at the temperature of –24 °C. Immediately before the analysis, the samples were unfrozen, then the heartwood and the sapwood were visually marked (fig. 2).

a *b*

Fig. 2. Kerns from the reference (*a*) and pruned (*b*) spruce trees

The sapwood was separated from the bark and the heartwood in the tangential direction with a knife and divided into 2–3 mm thick wood chips. They were dried in a freeze-dryer and ground with an MF 10 Basic mill (IKA-WERKE, GMBH & Co. KG, D-79219 Staufen, Germany) equipped with a 1-mm sieve.

Isolation of the extractives. Freeze-dried and milled wood was extracted with an Accelerated Solvent Extractor 200 (ASE200, Dionix, USA). 5 g of the wood sample was placed in a 33-mL stainless steel ASE-cell and extracted with acetone:water (95:5 v/v) in a nitrogen atmosphere at the temperature of 100 °C and the pressure of 2,000 Psi during 10 min (5 min×2 times). The extracts were quantitatively transferred in 50 mL measuring flasks and these volumes were adjusted with acetone.

Gravimetric analysis of the extractives. 20 mL of the extract solution was transferred into a pre-weight test tube and evaporated with a nitrogen flow on a water bath at the temperature of 40 °C. The residue was finally dried in a vacuum-desiccator for 1 h and weighed.

GC-analysis of the extractives. 0.5 mL of the extract was transferred in to a 10 mL test tube equipped with a hermetically sealing Teflon-coated screw cap; 4 mL of internal standards in methyl-*tert*-butyl ether (MTBE) solution, containing exactly 0.02 mg/mL of each: heneicosanoic acid, cholosteryl heptadecanoate, 1,3-dipalmitoyl-2-oleyglycerol (Sigma Chemical Co., St. Louise MO, USA) and betulinol (isolated and purified in the Laboratory of Wood and Paper Chemistry at Åbo Akademi University, Finland) was added; the tube content was evaporated with a nitrogen flow in a water bath at 40 °C. After additional drying in a vacuum-desiccator at 40 °C for 30 min, the extractives were silylated with 200 µL of BSFTA:TMCS:Pyridine (4:1:1 v/v/v) at room temperature overnight in the dark.

The extractives were analysed by a Gas Chromatography (GC) method using short and long capillary columns. The group analysis of high-boiling steryl esters and triglycerides was performed with the short column. The long column was used to determine the component composition of fatty and resin acids as well as the other relatively low-molar-mass compounds.

The GC-analysis on the short column was performed with a GC-instrument Perkin Elmer Clarus 500 equipped with a capillary column HP-1 (7 m×0.53 mm, film thickness 0.15 μm). The protocol for the column oven was as follows: starting temperature 100 °C, hold time 0.5 min, temperature increase rate 12 °C/min, end-temperature 340 °C, hold time 5 min. The injector was a programmable evaporator with the protocol: starting temperature 80 °C, hold time 0.1 min, temperature increase rate 50 °C/min to 110 °C, then with the rate of 15 °C/min, end-temperature 330 °C, hold time 7 min. Hydrogen with the flow rate of 7 mL/min was used as a carrier gas. The GC-instrument was equipped with a Flame-Ionization Detector (FID) heated at 350 °C. The sample volume was 3 μL (direct injection into the column).

The GC-analysis on the long column was performed with a GC-instrument Perkin Elmer Auto SystemXL equipped with capillary columns: channel A - HP-1 (25 m×0.2 mm, film thickness 0.11 μm); channel B - HP-5 (25 m×0.2 mm, film thickness 0.11 μm). The protocol for the column oven was as follows: starting temperature 120 °C, hold time 1 min, temperature increase rate 6 °C/min, end-temperature 320 °C, hold time 15 min. The injector was a programmable evaporator with the protocol: starting temperature 160 °C, temperature increase rate 8 °C/min end-temperature 260 °C, hold time 15 min. Hydrogen with the flow rate of 0.8 mL/min (20 mL/min including split) was used as a carrier gas. The GC-instrument was equipped with a Flame-Ionization Detector (FID) heated at 310 °C. The sample volume was 3 μL (split 1:24).

Gel Permeation Chromatography (GPC) of the extractives. The molar mass distribution of the extractives was analysed by an HP-GPC (Shimadzu chromatographic system; LC-10ATVp, SIL-20AHT, CTO-10ACvp equipped with two Jordi Gel DVB 500A columns (300 mm×7.8 mm) and a similar guard column (50 mm×7.8 mm), and a SEDERE SEDEX 85 LT evaporative light scattering detector (ELSD). The sample concentration was adjusted to ca 1 mg/mL of the extractives (based on the above-mentioned gravimetric determination). Tetrahydrofuran (THF) with 1 % acetic acid was used as eluent with the flow rate of 0.8 mL/min. The injection volume was 50 μL.

GC-analysis of mono-/disaccharides. Mono-/disaccharides in the extracts were determined with GC after the direct silylation of freeze-dried aliquots. Dry sample silylation was performed with a mixture of BSTFA:TMCS:pyridine (4:1:1 v/v/v) at ambient conditions overnight. The silylated samples were then analysed by a GC-FID using a PerkinElmer Clarus 500 gas-chromatograph equipped with PH-1 (25 m×0.2 mm, 0.11 μm film thickness) and PH-5 (25 m× ×0.2 mm, 0.11 μm film thickness) capillary columns, with the oven temperature programming: starting temperature 100 °C, hold time 8 min, temperature increase rate 2 °C/min to 170 °C, then with the rate of 12 °C/min, end-temperature 310 °C, hold time 7 min. The temperature of the injector and the detector was 250 °C and 320 °C, respectively. The sample injection volume was 1 μl and the split ratio 1:30.

Mono- and disaccharides were quantified against xylitol using correction factors, which were determined by a separate analysis of authentic mono-/disaccharides.

Analysis of hemicelluloses and pectins. To characterize the chemical composition of hemicelluloses and pectins in the wood samples acid methanolysis and GC were applied [26].

3 mg of the pre-extracted with acetone:water (95:5 v/v) and dried wood sample were weighed (±0.01 mg) in a 10 mL pear-shaped flask, equipped with a hermetically sealing Teflon-coated screw cap. 2 mL of 2M HCl in dry methanol were added to the flask, which was then hermetically screwed and heated in an oven at 105 °C for 5 h. During the methanolysis, the flask was carefully shaken 5 times avoiding wood particles on its wall. After the methanolysis, the flask was cooled down in the air, opened and the residual acid was neutralized with 200 µL of pyridine. 1.5 mL of the internal standard (0.1 mg/mL of sorbitol in methanol) was added to neutralize the solution and the solvent was evaporated with a nitrogen flow at 40 °C. The content was additionally dried in a vacuum-desiccator at 40 °C for 40 min and silylated with 200 µL of HMDS + 100 µL of THMS + 150 µL of pyridine overnight.

The TMS-derivatives of sugars and uronic acids were analysed with the GC method using a Varian 3400 instrument equipped with a capillary columns HP-1 (25 m×0.20 mm; film thickness 0.11 µm) and HP-5 (25 m×0.20 mm; film thickness 0.11 µm). The protocol for the column oven was as follows: starting temperature 100 °C, temperature increase rate 4 °C/min to reach the temperature of 175 °C, then the temperature rate was changed to 12 °C/min, end-temperature 290 °C, hold time 5 min. Hydrogen with a flow rate of 1 mL/min was used as a carrier gas. The injector was a conventional evaporator heated at the temperature of 260 °C. The GC-instrument was equipped with a Flame-Ionization Detector (FID) heated at 290 °C. The sample volume was 0.8 µL (split 1:20).

Analysis of cellulose. Cellulose content in the wood samples was analysed by acid hydrolysis combined with GC [26].

10 mg (±0.01 mg) of the pre-extracted with acetone:water (95:5 v/v) and dried wood sample were weighed in a 10 mL test tube equipped with a Teflon coated screw cap. Another test tube with 5 mg (±0.01 mg) of dried pure cotton linters was used to provide the overall calibration of the method. After adding a small glass ball to each test tube, both of them were placed in to the ice bath. 0.2 mL of 72 % H_2SO_4 was added to the cooled test tube with the sample, visually ensured that the wood sample was wetted with the acid; the tube was kept at the ambient temperature for 2 h. During that 2 h of the impregnation stage, the air from the wood pores was 4–5 times evacuated in a vacuum-desiccator and the testing tube was thoroughly shaken with a laboratory shaker. 0.5 mL of deionized water was added to the test tube and the content was shaken every 20 min for 4 h at the ambient temperature; then 6 mL of deionized water was added and the reaction content was kept overnight.

Hydrolysis of the wood sample was performed under pressure in the autoclave at 125 °C for 90 min (CertoClav Stem-sterilizer CV-EL 10 l/12 l, Sterilizer GmbH, Traun, Austria). When the test tube was cooled down, a few droplets of 0.04 % bromcresol green was added into the hydrolysate, then it was neutralized with $BaCO_3$ (the indicator turned colour from yellow to blue), 1 mL of 5 mg/mL of sorbitol in water (internal GC standard) was added and thoroughly mixed. The suspension in

the test tube was centrifuged for 60 min at 1500 rpm. 1 mL aliquot of supernatant was pipetted into an empty test tube equipped with a Teflon coated screw cap; the neutralized hydrolysate was evaporated with a nitrogen flow at 40 °C (2 portions of 2 mL of acetone was added to assist water removal). Finally, the hydrolysate sample was dried in a vacuum-desiccator at 40 °C for 40 min and silylated with 100 μL pyridine + 170 μL HMDS + 75 μL TMCS overnight at room temperature.

TMS-derivatives of sugars were analysed with a Varian 3400 gas chromatograph using the conditions for hemicelluloses and pectins as described above.

The cellulose content in the sample was calculated based on the amount of glucose obtained by acid hydrolysis minus glucose obtained from hemicelluloses, i.e., glucose in galactoglucomannan determined by acid methanolysis as described above, and minus glucose in mono-/disaccharides (monomeric glucose and glucose unit in sucrose).

Analysis of lignin. Lignin in the wood sample was determined by the Acetyl Bromide (AcBr) method [18]: 4 mg of pre-extracted and dried wood sample were weighed in a 10 mL test tube equipped with a Teflon coated screw cap and added 5 mL of 25 % AcBr in glacial acetic acid and 0.2 mL of perchloric acid. The tube content was heated at 70 °C for 30 min until total wood dissolution. The test tube was then cool down to room temperature, its content was transferred to 50mL measuring flacks containing 10mL 2M NaOH + 12 mL glacial acetic acid. After adjusting the solution with acetic acid to desired 50 mL volume level its UV-absorption at 280 nm was measured using a Perkin-Elmer Lambda 40 UV-VIS spectrometer (Perkin Elmer, Inc., Norwalk, Connecticut, USA). For UV-absorption measurement was used calibration with spruce milled wood lignin (MWL).

Results and discussion

Dynamics of wood growth and formation. The long-term stationary research resulted in developing a new technology of growing high-quality timber of Norway spruce [1]. This technology includes the selection of stands and trees, promising for further cultivation; the determination of the optimal height and diameter of the treated trees, as well as their age for one-, two-, and three-stage pruning; the age limit suitable for the treatment; the number of removed and left whorls (intensity of pruning); the season of the treatment; the number of trees to be treated per ha; the required tools, the methodology of using the tools, etc.

Based on the growth of the 80-year-old model spruce trees (site index/bonitet – Ia), the potential increase in the volume of high-quality knot-free wood per ha was calculated. The amount of this wood will be 150–180 m^3/ha by the harvesting age [1]. Since this type of wood is considerably more expensive (by 4–10 times according to different sources) than the non-treated, pruning should be considered as a perspective investment.

Extractives. The total amount of acetone-soluble extractives (gravimetric analysis) was found to be higher in sapwood than in heartwood, i.e. 15.4–18.1 mg/g wood versus 12.9–11.1 mg/g wood, respectively for the reference and pruned trees (table 1). The abundance of extractives in sapwood is well established and, probably related to living parenchyma cells, which serve as the foundation of the ground tissue system in trees.

Table 1

Extractives isolated from the sapwood and heartwood from the pruned and reference spruce trees, μg/g wood

Component	Sapwood		Heartwood	
	Reference	Pruned	Reference	Pruned
Total extractives (gravimetric analysis)	15,400	18,100	12,900	11,100
Fatty acids				
14:0	12.2	10.6	2.8	3.2
16:1	12.6	13.5	8.9	7.0
16:0	87.4	101.3	30.8	33.3
17:0	31.1	37.2	28.5	16.3
18:3	48.2	46.5	157.2	150.8
18:2	81.0	97.9	252.5	237.6
18:1(9)	97.0	131.1	96.4	75.9
18:1(11)	21.9	28.3	28.4	24.3
18:0	26.9	34.2	18.2	16.9
20:3	12.0	15.4	29.2	27.5
20:0	17.7	23.5	6.9	9.7
22:0	17.8	17.2	39.6	32.3
24:0	21.1	16.3	52.1	38.0
Sum	486.9	573.1	751.4	673.0
Resin acids				
Pimaric acid	52.2	62.2	40.3	31.1
Sandaracopimaric acid	108.6	140.1	81.8	68.7
Isopimaric acid	185.4	231.5	147.4	117.4
Palustric acid	26.2	54.5	51.9	37.0
Levopimaric acid	2.3	4.2	6.0	6.1
Dehydroabietic acid	701.3	917.9	527.3	439.9
Abietic acid	45.9	55.5	78.4	57.7
Neoabietic acid	5.8	12.5	16.1	11.9
Sum	1,127.6	1,478.3	949.2	769.6
Saturated fatty alcohols				
Docosanol	51.2	57.0	56.6	53.1
Tetracosanol	40.5	36.3	80.3	65.1
Sum	91.7	93.4	137.0	118.2
Lignans				
Todolactol(1)	2.7	2.9	4.0	2.6
Todolactol(2)	42.4	16.2	76.9	72.2
Isolariciresinol	3.9	4.3	4.0	2.6

Table 1 ending

Component	Sapwood		Heartwood	
	Reference	Pruned	Reference	Pruned
Lignans				
Secoisolariciresinol	9.8	5.3	30.1	28.9
Conidendric acid	5.4	2.5	19.3	16.1
Matairesinol	9.0	4.8	28.9	21.1
Lignan A	4.9	8.8	9.0	8.5
HMR(1)	15.0	6.6	105.9	77.7
HMR(2)	103.5	35.2	354.7	234.1
Conidendrin	12.1	7.3	16.4	21.1
Pinoresinol	7.2	5.2	18.9	18.4
Sum	215.9	99.2	668.1	503.2
Sterols				
Campesterol	38.7	36.7	70.7	59.5
Campestanol	7.1	8.4	10.2	9.3
Sitosterol	93.1	77.3	219.9	175.9
Sitostanol	33.9	34.0	42.6	37.7
Sum	172.8	156.4	343.4	282.4
Triterpenes				
Squalene	10.1	22.7	12.2	11.8
Lupeol	4.9	3.7	2.7	1.6
Cycloartenol	3.2	3.2	5.8	6.3
Methylcycloartanol	4.8	5.3	7.3	7.5
Sum	23.0	34.9	28.2	27.2
Steryl esters and Triglycerides				
Steryl esters	373.4	477.9	1021.6	918.0
Triglycerides	551.5	616.5	489.7	351.8
Mono-/di-saccharides				
Galactose	65.1	90.8	13.7	9.1
Glucose	160.8	172.9	24.9	106.3
Fructose	1,055.4	2,093.6	75.0	136.8
Saccharose	24.2	14.7	15.1	19.1
Sum	1,305.4	2,372.0	128.8	271.3
Total extractives (GC-analysis)	4,348.2	5,901.8	4,517.3	3,914.7

The acetone-soluble wood extractives are very complex mixtures of different groups of organic compounds and mainly consist of both lipophilic and polar substances (fig. 3, table 1). The GPC analysis revealed the dominance of triglycerides, steryl esters, fatty and resin acids in the obtained extracts. The amount of monosaccharides in the extracts was also substantial.

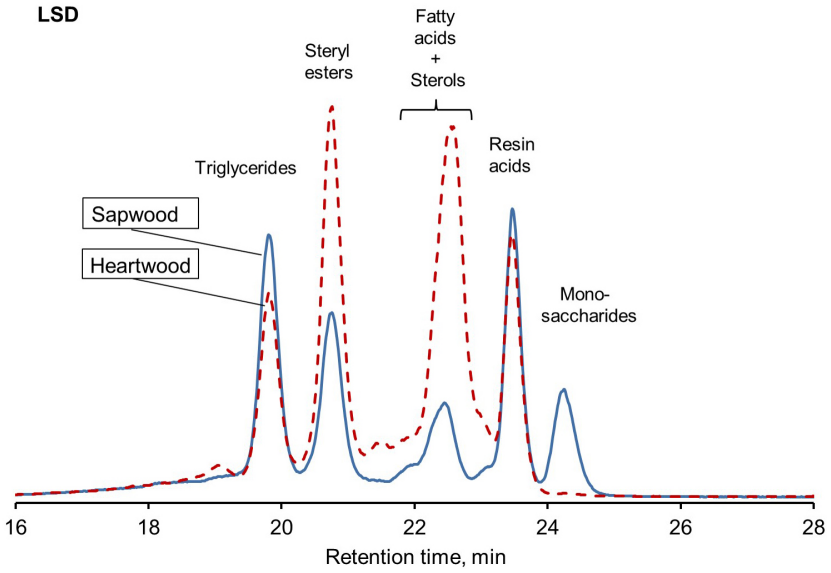


Fig. 3. GPC chromatograms of the extractives from the sapwood and heartwood of the pruned spruce tree

It should be noted, however, that monosaccharides are almost not soluble in THF (eluent in the GPC analysis), so the real amount of them in the acetone-soluble extractives should be much higher than shown in the GPC chromatogram.

The differences between group compositions of the extractives from the sapwood and heartwood were mostly quantitative. The sapwood extractives contain a bit more triglycerides, resin acids, and monosaccharides (THF-soluble part). On the contrary, the heartwood extractives included a higher quantity of steryl esters and fatty acids. The component composition of the acetone-soluble extractives from different wood tissues from the reference and pruned trees is shown in table 1.

Resin acids in sapwood were the dominating group of the extractives obtained from the pruned trees, amounting to 1,480 μg/g wood. The higher content of resin acids in sapwood from the pruned trees compared to that from the reference trees (1,130 μg/g wood) was mostly due to the higher content of dehydroabietic acid (920 μg/g wood) as well as isopimaric (230 μg/g wood) and sandaracopimaric (140 μg/g wood) acids. Such differences in resin acid content in sapwood between the reference and pruned trees can be explained by the defense mechanism of wounded trees against plant pathogens, induced by pruning [11, 13, 17].

The amount of resin acids in heartwood was also high, but lower than that in sapwood, i.e. 950 μg/g wood and 770 μg/g wood in the reference and pruned trees, respectively. The most abundant resin acid in heartwood was dehydroabietic (530 μg/g wood and 440 μg/g wood in the reference and pruned trees, respectively).

Steryl esters in heartwood comprised the second most abundant group of the extractives of both reference and pruned trees, i.e. 1,020 μg/g wood and 920 μg/g wood, respectively. This was several times higher than the steryl esters content in the corresponding sapwood.

Fatty acids represented the third abundant group of the extractives. Their content in the heartwood of both reference and pruned trees was slightly higher than that in the sapwood, i.e. 750–670 μg/g wood versus 490–570 μg/g wood, respectively. The individual compounds dominating in this group were unsaturated acids C18:2, C18:3, and C18:1(9), which together comprised more than 65 % of the fatty acids from all heartwood samples. In sapwood, the most prominent fatty acids were C16, C18:2, and C18:1(9), which covered more than 50 % of the fatty acids in all sapwood samples.

Triglycerides amount in the extractives was similar to that of the fatty acid group. More triglycerides were found in the sapwood of both reference and pruned trees in comparison with the heartwood, i.e. 550–620 μg/g wood versus 490–350 μg/g wood, respectively. This difference in triglycerides distribution between sapwood and heartwood is typical for a healthy spruce tree and well documented in the literature [20, 29].

Lignans content in heartwood was substantial and several times higher compared to sapwood. Their content in the reference trees was higher than that in the pruned trees, i.e. for sapwood it was 220 μg/g wood versus 100 μg/g wood, respectively; for heartwood – 670 μg/g wood versus 500 μg/g wood, respectively. High lignan content in heartwood compared to sapwood is in good agreement with the literature data [29]. Hydroxymatairesinol isomers HMR(1) and HMR(2) were the most prominent in this group of extractives from all the trees and amounted to more than 40 and 60 % of total lignans in sapwood and heartwood, respectively.

Sterols, a typical group of extractives found in spruce wood; their distribution pattern in a tree stem was similar to steryl esters, i.e. more sterols were found in heartwood than in sapwood: 340–280 μg/g wood versus 170–160 μg/g wood in the reference and pruned trees, respectively. Sitosterol was the most abundant compound in this group of extractives; it amounted to more than 50 % of total sterols in all the trees.

Saturated fatty alcohols were represented in the extracts by two compounds, i.e. docosanol and tetracosanol. Their content in heartwood was notable and a bit more prominent than that in sapwood, i.e. 140–120 μg/g wood versus 90–80 μg/g wood in the reference and pruned trees, respectively.

Triterpenes were also found in all the extracts in a small and approximately the same quantity in the range of 20–30 μg/g wood. The most prominent compound in this group of extractives was squalene, it constituted about half of their total amount.

Mono-/di-saccharides represented a large portion in the sapwood extracts from all the trees, i.e. 1,310 μg/g wood and 2,370 μg/g wood in the reference and pruned trees, respectively. In heartwood the amount of those sugars was found to be dramatically lower, i.e. 130 μg/g wood and 270 μg/g wood in the reference and pruned trees, respectively. Fructose was the most prominent monosaccharide in the sapwood (80–90 % of extracted sugars) and heartwood (50–60 % of extracted sugars) from all the trees. Such differences in sugar content from different wood tissues are well known; they reflect the biological activity of the living versus dead parts of a tree (sapwood versus heartwood). In this case, it's relevant to note, that both sapwood and heartwood contained a double amount of fructose in the pruned trees compared to the reference trees. As sugars reserves are produced in a tree by the photosynthesis in the

leaves, this could be an interesting phenomenon, probably related to trees pruning and the size of the crown [8].

Hemicelluloses and pectins are the second abundant group of plant constituents and structural compounds of a wood cell wall. They are a complex mixture of different heteropolysaccharides built up with pentose and hexose sugar units, including uronic acids (table 2).

Table 2

Composition of hemicelluloses and pectins in the sapwood and heartwood from the pruned and reference spruce trees

Component	Sapwood				Heartwood			
	Reference		Pruned		Reference		Pruned	
	mg/g wood	sugars ratio	mg/g wood	sugars ratio	mg/g wood	sugars ratio	mg/g wood	sugars ratio
Mannose	103.6	6.8	113.2	6.6	120.3	5.4	113.8	5.4
Glucose	31.3	2.1	35.2	2.0	42.8	1.9	41.5	2.0
Galactose*	15.1	1.0	17.2	1.0	22.1	1.0	21.2	1.0
Xylose	38.9	9.3	40.8	8.9	54.0	8.8	53.4	8.6
Arabinose	9.7	2.3	9.2	2.0	12.4	2.0	11.9	1.9
Glucuronic acid	0.7	0.2	0.5	0.1	1.0	0.2	0.9	0.1
4-O-Me-Glucuronic acid	4.2	1.0	4.6	1.0	6.1	1.0	6.2	1.0
Galacturonic acid	10.4	5.5	11.8	6.2	15.0	5.8	14.7	5.9
Rhamnose	1.9	1.0	1.9	1.0	2.6	1.0	2.5	1.0
Total	215.8		234.5		276.3		266.0	

*Some galactose units may also originate from galactan.

In spruce, galactoglucomannan (GGM) is the dominating hemicellulose: 150–166 mg/g wood and 185–176 mg/g wood in sapwood and heartwood, respectively. The sapwood in the pruned trees contained about 10 % more GGM than in the reference tree. On the other hand, a bit more GGM (ca 5 %) was found in the heartwood of the reference tree than from the pruned tree. It is possible, that GGM in the sapwood was less branched than in the heartwood since the ratio between mannose+glucose (main backbone sugar units) and galactose (a side chain sugar unit) was higher for sapwood (8.9/1 – 8.6/1) than for heartwood (7.3/1 – 7.4/1). However, a small amount of galactose units may also originate from galactan.

Xylan is a minor hemicellulose in spruce; it contains arabinose and uronic acids in the side chains and thus, carries the anionic charge. Xylan exhibited lower content in sapwood (54–55 mg/g wood) compared to heartwood (74–72 mg/g wood), which followed the distribution patterns for GGM [9, 25]. Differences between xylan distribution in wood tissues from the reference and pruned trees were not clear.

Pectins in spruce wood usually exist in a small (ca 1 %) quantity. They are highly charged polysaccharides due to a large amount of galacturonic acid, which is methyl esterified to a high degree in native wood [21]. Similar to GGM and xylan, pectin content in the sapwood was lower than in the heartwood from all the trees, i.e. 12.3–13.7 mg/g wood versus 17.6–17.1 mg/g wood, respectively. Based on the

ratio between galacturonic acid (main backbone sugar unit) and rhamnose (side chain sugar unit) it can be suggested, that pectins in sapwood/heartwood from the pruned trees were less branched than those in the wood tissues from the reference trees.

Lignin is a structural compound of the cell wall and the third abundant compound in wood. The content of lignin in different wood tissues from all the trees varied greatly (table 3). The results clearly indicate that heartwood contains more lignin compared to sapwood, as previously reported by [9, 14]. It appears, that in comparison to the wood from the reference trees the pruned trees were more lignified. Substantially more lignin was found in the sapwood from the pruned trees than from the reference trees, i.e. 257.3 mg/g wood and 237.9 mg/g wood, respectively. Similar lignin distribution profile was found in the heartwood: 294.2 mg/g wood versus 272.6 mg/g wood of lignin in wood from the pruned and reference trees, respectively.

Table 3

Lignin and cellulose content in the sapwood and heartwood from the pruned and reference spruce trees, mg/g wood

Component	Sapwood		Heartwood	
	Reference	Pruned	Reference	Pruned
Lignin	237.9	257.3	272.6	294.2
Cellulose	458.8	437.4	423.8	415.2

Lignin contributes not only to the mechanical strength of trees but can also serve as a barrier for pests and pathogens, playing an important role in the biodefense mechanism [10, 28]. Such regulation of lignin synthesis in wood as a defensive response to the tree damage caused by pruning seems to be a logical explanation of the high lignin content in the wood of the pruned trees compared to the reference trees.

Cellulose is the principal structural compound of the wood cell wall. Its distribution pattern between sapwood and heartwood was found to be inverse to the corresponding lignin content, i.e. more cellulose in sapwood than in heartwood (table 3). This is a well-established statement for coniferous wood species [9, 24, 27].

It was found that both sapwood and heartwood from the reference tree contained more cellulose than those from the pruned tree, i.e. 458.8 mg/g – 423.8 mg/g wood versus 437.4 mg/g – 415.2 mg/g wood, respectively. The low cellulose content in the sapwood/heartwood from the pruned tree can be due to the high amount of lignin in those wood tissues, as described above.

Conclusion

Spruce tree pruning is a well-known forestry technology resulting in high-quality knot-free wood with considerably high mechanical properties and value. The chemical composition of wood tissues of the reference and pruned trees was almost similar. However, compared to the reference trees, in the wood tissues from the pruned trees, there was found: a higher amount of resin acids in sapwood; high lignin amount in both sapwood and heartwood; the double amount of fructose in both sapwood and heartwood.

The first two phenomena can be explained by the response of trees to their pruning as a defense mechanism against plant pathogens. The last one must be a result of the current physiological activity of those trees, possibly related to differences in crown sizes.

REFERENCES

1. *Антонов О.И.* Влияние обрезки ветвей на рост культур и качество древесины ели: дис. … канд. с.-х. наук. СПб., 2000. 104 с.

Antonov O.I. *Pruning Effect on Growth and Wood Quality of Spruce Plantations*: Cand. Agric. Sci. Diss. Saint Petersburg, 2000. 104 p.

2. *Давыдов А.В.* Влияние сомкнутости насаждения и рубок ухода за лесом на сучковатость и форму стволов // Рубки ухода за лесом.: сб. тр. ЦНИИЛХ. Л.: Гослестехиздат, 1940. С. 5–49.

Davydov A.V. Influence of Plantation Density and Improvement Thinning on Knotting and Shape of Tree Trunks. *Collection of Academic Papers "Improvement Thinning"*. Leningrad, Goslestekhizdat Publ., 1940, pp. 5–49.

3. *Питикин А.И.* Обрезка сучьев в еловых насаждениях Карпат // Лесн. хоз-во. 1972. № 8. С. 27–28.

Pitikin A.I. Pruning in Spruce Plantations of the Carpathians. *Lesnoye khozyaystvo*, 1972, no. 8, pp. 27–28.

4. *Полубояринов О.И.* Оценка качества древесного сырья. Л.: ЛТА, 1971. 72 с.

Poluboyarinov O.I. *Wood Raw Material Quality Assessment*. Leningrad LTA Publ., 1971. 72 p.

5. *Ткаченко М.Е.* Общее лесоводство. Л.: Гослестехиздат, 1939. 746 с.

Tkachenko M.E. *General Forestry*. Leningrad, Goslestekhizdat Publ., 1939. 746 p.

6. Arvidson A. Pruning for Quality. *Small Scale Forestry*, 1986, no. 1, pp. 1–7.

7. Axel R. Wirtschaftlichkeit der Wertastung. *Allgemeine Forst Zeitschrift fur Waldwirtschaft und Umweltsorge*, 1989, Bd. 44-45, S. 1188–1190.

8. Bamber R.K. *Sapwood and Heartwood*. Technical Publication No. 2. Sydney, Forestry Commission of New South Wales, 1987. 7 p.

9. Bertaud F., Holmbom B.R. Chemical Composition of Earlywood and Latewood in Norway Spruce Heartwood, Sapwood and Transition Zone Wood. *Wood Science and Technology*, 2004, vol. 38, iss. 4, pp. 245–256. DOI: https://doi.org/10.1007/s00226-004-0241-9

10. Bhuiyan N.H., Selvaraj G., Wei Y., King J. Role of Lignification in Plant Defense. *Plant Signaling & Behavior*, 2009, vol. 4, iss. 2, pp. 158–159. DOI: https://doi.org/10.4161/psb.4.2.7688

11. Clark J.R., Matheny N. The Research Foundation to Tree Pruning: A Review of the Literature. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2010, vol. 36(3), pp. 110–120.

12. Ehring A. Pruning for Quality Improvement. *Materials of the Site Waldwissen*. 2016. Available at: https://www.waldwissen.net/en/forestry/silviculture/stock-management/pruning-for-quality-improvement (access 16.04.20).

13. Ekman R., von Weissenberg K. Sapwood Extractives in Norway Spruce Inoculated with *Fomes annosus*. *Acta Academiae Aboensis, Ser. B Mathematica et Physica*, 1979, vol. 39, nr. 7, pp. 1–8.

14. Fengel D., Wegener G. *Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin, Walter de Gruyter, 1989. 613 p.

15. *Finnish Statistical Yearbook of Forestry*. Ed. by A. Peltola. Tampere, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan toimipaikka, 2014. 426 p.

16. Giefing D.F., Jonasz K., Wesoły W. The Response of Thick-Branched Pine Trees to Pruning. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 2004, vol. 7, iss. 2. 9 p.

17. Holmbom T., Reunanen M., Fardim P. Composition of Callus Resin of Norway Spruce, Scots Pine, European Larch and Douglas Fir. *Holzforschung*, 2008, vol. 62, iss. 4, pp. 417–422. DOI: https://doi.org/10.1515/HF.2008.070

18. Iiyama K., Wallis A.F.A. An Improved Acetyl Bromide Procedure for Determining Lignin in Woods and Wood Pulps. *Wood Science and Technology*, 1988, vol. 22, iss. 3, pp. 271–280. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00386022

19. Kannisto K., Heräjärvi H. Rauduskoivun pystykarsinta oksasaksilla – vaikutus puun laatuun ja taloudelli seen tuottoon. *Metsätieteen aikakauskirja*, 2006, nr. 4, pp. 491–505. DOI: https://doi.org/10.14214/ma.6316

20. Nisula L. *Wood Extractives in Conifers*. Doctoral Thesis. Turku/Åbo Finland, Åbo Akademi University Press, 2018. 253 p.

21. Pranovich A., Eckerman C., Holmbom B. Determination of Methanol Released from Wood and Mechanical Pulp by Headspace Solid-Phase Microextraction. *Journal of Pulp and Paper Science*, 2002, vol. 28(6), pp. 199–203.

22. Schatz U., Heräjärvi H., Kannisto K., Rantatalo M. Influence of Saw and Secateur Pruning on Stem Discolouration, Wound Cicatrisation and Diameter Growth of *Betula pendula*. *Silva Fennica*, 2008, vol. 42, no. 2, pp. 295–305. DOI: https://doi.org/10.14214/sf.258

23. Scholzke D. Die Astung von Fichtenbestanden in der Bundesrepublik Deutschland. *Forstund Holzwirt*, 1982, Bd. 12, S. 307–308, 310, 312, 314.

24. Shupe T.F., Hse C.Y., Choong E.T., Groom L.H. Differences in Some Chemical Properties of Innerwood and Outerwood from Five Silviculturally Different Loblolly Pine Stands. *Wood and Fiber Science*, 1997, vol. 29, no. 1, pp. 91–97.

25. Sjöström E. *Wood Chemistry*. London, Academic Press, 1993. 293 p.

26. Sundberg A., Sundberg K., Lillandt C., Holmbom B.R. Determination of Hemicelluloses and Pectins in Wood and Pulp Fibres by Acid Methanolysis and Gas Chromatography. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 1996, vol. 11, iss. 4, pp. 216–219. DOI: https://doi.org/10.3183/npprj-1996-11-04-p216-219

27. Timell T.E. *Compression Wood in Gymnosperms*. Berlin, Springer, 1986. 625 p.

28. Vance C.P., Kirk T.K., Sherwood R.T. Lignification as a Mechanism of Disease Resistance. *Annual Review of Phytopathology*, 1980, vol. 18, pp. 259–288. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.py.18.090180.001355

29. Willför S., Hemming J., Reunanen R., Eckerman C., Holmbom B. Lignans and Lipophilic Extractives in Norway Spruce Knots and Stemwood. *Holzforschung*, 2003, vol. 57, no. 1, pp. 27–36. DOI: https://doi.org/10.1515/HF.2003.005

ВЛИЯНИЕ ОБРЕЗКИ ВЕТВЕЙ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДРЕВЕСИНЫ ЕЛИ ЕВРОПЕЙСКОЙ (*Picea abies* (L.) Karst.)

А.В. Пранович*[1,2]*, канд. хим. наук, ст. науч. сотр., доц.; *ResearcherID: H-4533-2016, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3615-8582*

О.И. Антонов*[2,3]*, канд. с.-х. наук, доц., вед. науч. сотр.; *ResearcherID: H-1480-2015, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2869-9234*

А.А. Добровольский*[2]*, канд. с.-х. наук, доц.; *ResearcherID: ABF-7706-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6816-4912*

[1]Университет Академии Або, ул. Портхансгатан, д. 3, г. Турку, Финляндия, 20500; e-mail: apranovi@abo.fi

[2]Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021;
e-mail: alexander-83@yandex.ru

[3]Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, Институтский просп., д. 21, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: woodfm@mail.ru

Аннотация. Цель исследования – изучение влияния обрезки ветвей на химический состав древесины ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst), включая ядровую древесину и заболонь. В качестве контрольной использовалась древесина деревьев, не подвергнутых обрезке. Интенсивность удаления части ветвей составляла: 35–41 % от общей длины кроны – у деревьев со средним и менее среднего диаметром на высоте груди и 28 % – у деревьев с диаметром выше среднего. Компонентный состав растворимых в ацетоне экстрактивных веществ был проанализирован посредством газовой хроматографии на длинной и короткой колонках, молярно-массовое распределение найдено с помощью гель-проникающей хроматографии. В предварительно экстрагированных образцах древесины определяли содержание целлюлозы (кислотный гидролиз – газовая хроматография), лигнина (метод ацетилбромида) и состав гемицеллюлоз и пектиновых веществ (кислотный метанолиз – газовая хроматография). Растворимые в ацетоне экстрактивные вещества древесины представляют собой сложную смесь различных групп органических соединений, включая липофильные и полярные вещества. Анализ полученных экстрактов с использованием гель-проникающей хроматографии выявил преобладание в них триглицеридов, стериловых эфиров, жирных и смоляных кислот, а также значительного количества моносахаридов. Химический состав древесных тканей контрольных деревьев и деревьев из опыта был схож. Однако по сравнению с первыми древесина вторых характеризовалась повышенным количеством смоляных кислот в заболони, высоким количеством лигнина и в два раза большим уровнем фруктозы как в заболони, так и в ядровой древесине. Такие результаты можно объяснить реакцией деревьев на обрезку ветвей и воздействием патогенов (т. е. срабатыванием защитного механизма растения). Полученные данные также являются отражением физиологической активности обследованных деревьев и, возможно, связаны с различиями в размере их крон.

Для цитирования: Pranovich A.V., Antonov O.I., Dobrovolsky A.A. Pruning Influence on Chemical Composition of Spruce Wood (*Picea abies* (L.) Karst.) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 145–160. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-145-160

Ключевые слова: обрезка ветвей, *Picea abies*, химический состав древесины ели, экстрактивные вещества, целлюлоза, лигнин, гемицеллюлозы, газовая хроматография, гель-проникающая хроматография.

Поступила 16.04.20 / Received on April 16, 2020

УДК 676.16.022.32
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-161-169

ПОЛУЧЕНИЕ ЛИСТВЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ВЫСОКОГО ВЫХОДА БИСУЛЬФИТНЫМ СПОСОБОМ

Т.А. Королева[1,2], канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: ABB-5651-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9477-5864*
Л.А. Миловидова[1], канд. техн. наук, вед. инж. отдела планирования и сопровождения научных исследований; *ResearcherID: AAH-5551-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8035-5300*
А.А. Дряхлицын[1], инж. отдела планирования и сопровождения научных исследований; *ResearcherID: AAH-5772-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8218-8569*
[1]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: tataak@mail.ru, l.milovidova@narfu.ru
[2]Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова РАН, наб. Северной Двины, д. 23, г. Архангельск, Россия, 163000; e-mail: tataak@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки технологического режима получения бисульфитной лиственной целлюлозы высокого выхода на магниевом основании для производства различных видов тарного картона. Надежная и эффективная технология регенерации химикатов и тепла, реализуемая при бисульфитном способе варки, дает возможность применять его в условиях самостоятельного сульфитного производства. Исследовано влияние продолжительности стоянки на конечной температуре на выход целлюлозы и число каппа: стоянка на конечной температуре 160 °С более 40 мин приводит к нарушению избирательности варочного процесса; стоянка до 70 мин сопровождается снижением выхода целлюлозы на 6 % при постоянном значении числа каппа полуфабриката. В процессе варки использован гидромодуль 5, расход SO_2 – 15,0 %, pH варочного раствора – 4,3…4,5, продолжительность пропитки при 120 °С – 35 мин, варки при температуре 160 °С – 40 мин. Режим позволяет получить полуфабрикат высокого выхода 60…65 % с числом каппа 58…60 ед. без стадии горячего размола. В соответствии со стандартами Российской Федерации оценены характеристики механической прочности образцов, полученных в ходе эксперимента. Сопротивления продавливанию и плоскостному сжатию, разрывная длина и разрушающее усилие сопоставимы с показателями промышленного образца лиственной нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы при выходе полуфабриката 75…78 %. Показано, что присутствие коры в технологической щепе в количестве 7,5 % сопровождается снижением выхода бисульфитной лиственной полуцеллюлозы на 4,5 % и механической прочности – на 7,8 %.
Для цитирования: Королева Т.А., Миловидова Л.А., Дряхлицын А.А. Получение лиственной целлюлозы высокого выхода бисульфитным способом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 161–169. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-161-169
Финансирование: Работа выполнена в Инновационно-технологическом центре «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск.

Ключевые слова: лиственная древесина, бисульфитная целлюлоза, технологический процесс, свойства целлюлозы, нейтрально-сульфитная целлюлоза, тарный картон, флютинг.

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

Введение

По мнению ведущего мирового издания «Paper 360°», в настоящее время европейский рынок тарного картона переживает «золотое время». Спрос на данный товар высокий, что, безусловно, является причиной наращивания производственных мощностей бумажных фабрик и заводов, производящих полуфабрикаты высокого выхода [18]. В литературных источниках достаточно подробно освещены вопросы технико-экономического обоснования методов производства полуцеллюлозы и целлюлозы высокого выхода (ЦВВ), предназначенных для изготовления различных видов тарного картона: режимы производства [1, 2, 10–13, 21], качественные характеристики [9, 10, 14–16], оборудование [1, 2, 11].

При изготовлении тарных видов картона выбор композиции по волокну становится залогом оптимального сочетания жесткости и прочности готовой продукции. Но предприятия зачастую ограничены в выборе полуфабрикатов, их качестве и затратах на производство готовой продукции.

На данный момент основным способом получения ЦВВ является сульфатный, а для производства полуцеллюлозы – нейтрально-сульфитный (НСПЦ) способ. Россия занимает 3-е место на мировом рынке по производству НСПЦ (в 2018 г. выпуск составил 349 тыс. т) и 1-е место по производству небеленой сульфитной целлюлозы (в 2016 г. выпуск – 390 тыс. т) [17].

Лиственная полуцеллюлоза, полученная нейтрально-сульфитным способом и его модификациями, имеет высокие показатели прочности даже при выходе 73…75 % [9]. При степени помола полуфабриката 30 °ШР и массе 1 м^2 125 г разрывная длина составляет 9000 м, сопротивление излому –1000 двойных перегибов, продавливанию – 700 кПа, раздиранию – 1070 мН. Сопротивление плоскостному сжатию служит основным показателем, определяющим пригодность полуфабриката для получения бумаги-основы для гофрирования. НСПЦ при выходе выше 75 % имеет максимальное значение сопротивления плоскостному сжатию и считается наилучшим материалом для производства тарного картона. Однако общепринятой технологией в этом случае является совместная регенерация черного сульфатного и красного нейтрально-сульфитного щелоков, а их совместная переработка создает ряд трудностей. Нейтрально-сульфитный щелок отличается высоким содержанием серы, вследствие чего обеспечить допустимый уровень сульфидности в белом щелоке достаточно сложно. Решить данную проблему можно только за счет трудно выполнимого условия – обеспечения строго определенного соотношения производительностей заводов по выработке ЦВВ и НСПЦ.

В качестве альтернативного решения производственных затруднений, возникающих при выработке НСПЦ, может быть предложен способ бисульфитной варки на магниевом основании. Для этого способа существует надежная технология регенерации щелока, в котором отсутствует избыточный диоксид серы, что значительно упрощает эксплуатацию оборудования и снижает капитальные затраты [11]. Кроме того, бисульфитный способ варки может быть реализован в условиях самостоятельного сульфитного производства.

Ранее бисульфитную целлюлозу на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности России производили только из хвойной древесины, о возмож-

ности использования в качестве сырья лиственных пород древесины существуют лишь упоминания [11].

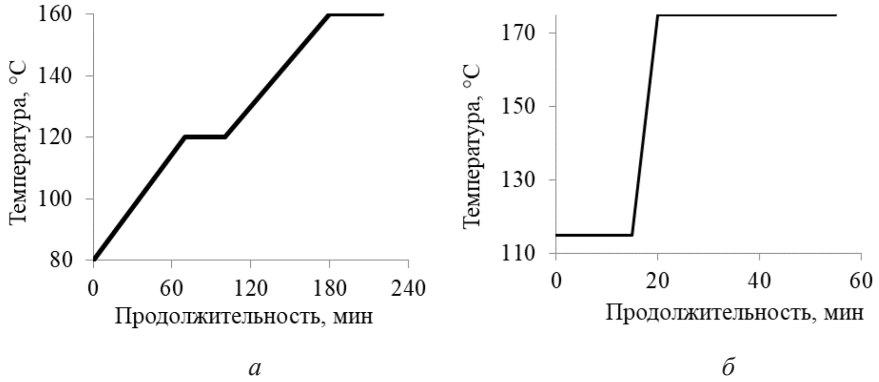
Таким образом, цель исследования заключалась в разработке оптимальных условий варки бисульфитной лиственной ЦВВ из щепы с содержанием коры 7,5 % и сравнение физико-механических характеристик бисульфитной ЦВВ и НСПЦ.

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели в лабораторных условиях были проведены бисульфитные и нейтрально-сульфитные варки щепы лиственной древесины. Технологическая щепа была отобрана на одном из российских предприятий. Породный состав древесины не определяли, но предприятием регламентировалось соотношение пород осина/береза как 70…80/20…30, соответственно. Наличие гнили в щепе выявлено не было. Содержание коры в щепе составило 7,5 %, что значительно превышает требования ГОСТа [6].

Для варок использовали щепу нормальной фракции с корой и без нее – остатки на ситах 20 и 10 мм с ситового анализатора щепы АЛГ-М. Варку проводили в стационарных автоклавах на глицериновой бане (температурный режим – см. рисунок). Выход целлюлозы и количество непровара определяли весовым методом. Сваренную массу промывали на сцеже, в процессе чего на сетке оставался непровар, который затем был доведен до абсолютно сухого состояния. Промытую целлюлозу кондиционировали и далее определяли коэффициент влажности. Выход целлюлозы и количество непровара рассчитывали в процентах по отношению абсолютно сухой массы целлюлозы и абсолютно сухой массы непровара к массе исходной абсолютно сухой древесины.

Из полученных образцов целлюлозы были изготовлены лабораторные отливки, у которых определяли: число каппа полуфабриката [3], сопротивление продавливанию (*BST*) [7], разрывную длину (*L*) [5], разрушающее усилие при сжатии кольца (*RCT*) [8], сопротивление плоскостному сжатию (*CMT*) [4].



а *б*

Температурный режим бисульфитной (*а*) и нейтрально-сульфитной (*б*) варки

Temperature regime of bisulfite (*а*) and neutral sulfite (*б*) cooking

Технология получения бисульфитной ЦВВ в лабораторных условиях была такой: варка в автоклавах и последующее разделение на волокна в гидроразбивателе в присутствии воды в течение 10 мин.

Образцы НСПЦ после варки подвергали размолу на лабораторной мельнице ЦРА в течение 10 мин с целью разделения полупроваренной щепы на волокна. Эталоном характеристик качества полученных образцов целлюлозы стали показатели, соответствующие техническим условиям АО «Архангельский ЦБК»: сопротивление продавливанию – 350 кПа, разрушающее усилие при сжатии кольца – 260 Н, сопротивление плоскостному сжатию – 260 Н, разрывная длина – 6000 м и более.

Для осуществления бисульфитных варок выбраны следующие условия: гидромодуль варки 5, расход SO_2 – 15,0 %, pH варочного раствора – 4,3…4,5. Варку НСПЦ проводили при гидромодуле 3,7, расход Na_2CO_3 составил 14,0 %. Температурные графики варок представлены на рисунке. Каждый режим варки целлюлозы воспроизводился в 4 автоклавах, полученные данные приведены как средние значения из 4 параллельных проб.

При проведении бисульфитных варок предварительно определена «точка дефибрирования» (ТД), т. е. выход полуфабриката, при котором сырье после варки разделяется на волокна без стадии дополнительного размола. ТД находили путем роспуска полученного полуфабриката в гидроразбивателе в течение 10 мин и дальнейшей промывки целлюлозы с отделением непровара.

Результаты исследования и их обсуждение

Для определения ТД образцов ЦВВ была проведена серия варок при различной продолжительности стоянки на конечной температуре, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты предварительных бисульфитных варок

Продолжительность стоянки, мин	Выход, %		Количество непровара, %	Число каппа
	общий	целлюлозы		
25	70,0	55,4	14,6	60,0
40	64,0	55,6	8,4	60,4
50	62,0	55,9	6,1	60,4
70	57,7	55,4	2,3	62,1

Как следует из данных, приведенных в табл. 1, наиболее полное разделение в гомогенизаторе щепы на волокна при концентрации массы 10…12 % достигается для образца полуфабриката, полученного при продолжительности стоянки 40 мин. Число каппа составляет 60 ед. при общем выходе 64 %. Этот режим приняли для варки лиственной бисульфитной ЦВВ. Непровар, образовавшийся в количестве около 8 %, представлял собой достаточно мягкий продукт, который также мог быть разделен на волокна в лабораторном гомогенизаторе.

Необходимо отметить, что увеличение продолжительности стоянки на конечной температуре более 40 мин приводит к нарушению избирательности процесса варки (число каппа полуфабриката остается на одном уровне, но снижается его выход на 2…6 %).

При производстве полуфабрикатов одной из причин снижения выхода и механической прочности целлюлозы является присутствие коры в щепе [19, 20]. В технологической щепе, используемой в опытах, содержание коры составило 7,5 %. Чтобы установить ее влияние на указанные характеристики продукции, дальнейший эксперимент включал варки бисульфитной целлюлозы из технологической щепы с корой и без нее по отработанному ранее режиму.

Для всех полученных образцов определены выход и число каппа. Изготовлены лабораторные отливки массой 1 м^2 125 г при степени помола волокна 30 ºШР. Полученные значения стандартных физико-механических характеристик и результаты анализа отработанных щелоков представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Общие характеристики бисульфитной ЦВВ и отработанных щелоков

Продолжительность стоянки, мин	Содержание коры в щепе, %	Выход, %		Число каппа	Показатели щелоков		
		общий	цел-люлозы		pH	SO_2, %	$S_2O_3^{2-}$, г/л
25	0	70,0	55,4	59,1	3,81	1,80	2,82
25	7,5	67,1	38,9	65,2	4,21	1,90	1,05
40	0	64,0	55,6	60,4	3,60	1,63	3,12
40	7,5	61,0	52,4	60,1	3,85	1,63	2,65

Таблица 3

Прочностные характеристики образцов бисульфитной ЦВВ

Продолжительность стоянки, мин	Содержание коры в щепе, %	*BST*, кПа	*CMT*, Н	*RCT*, Н	*L*, м
25	–	610	245	225	10600
25	7,5	575	230	210	10150
40	–	690	215	220	11750
40	7,5	565	215	200	10300

Снижение pH с 4,5 до 3,6…4,2 в отработанном щелоке является допустимым для бисульфитной варки и объясняется накоплением свободного SO_2 (варку проводили в автоклавах без сдувок). Содержание тиосульфата для всех проб щелоков не превышало предельно допустимого значения – 4,0 г/л, что свидетельствует о невысоком уровне разложения бисульфита [17]. Присутствие коры в щепе снижает выход полуфабриката и значения его физико-механических показателей (табл. 2, 3).

Анализ качественных характеристик бисульфитной ЦВВ (табл. 3) показал, что сопротивление продавливанию и разрывная длина превышают уровни, определенные [17] для НСПЦ. Жесткости (*CMT*, *RCT*) при этом ниже установленных [17] на 5…10 %, что нормально для полуфабрикатов с высокими прочностными показателями.

Характеристики лабораторного образца НСПЦ следующие: сопротивление продавливанию – 600 кПа, разрушающее усилие при сжатии кольца – 220 Н, сопротивление плоскостному сжатию – 220 Н, разрывная длина – 10 800 м. Полученный образец имел более высокое значение числа каппа по сравнению с бисульфитной ЦВВ. Однако число каппа НСПЦ ниже, чем обычно рекомендуется для нее – 90…100 ед., соответственно, и выход полуцеллюлозы оказался

меньше рекомендуемого – 78 %. При этом прочность и жесткость были практически такими же, как у образца бисульфитной ЦВВ.

Значения жесткости (*CMT*, *RCT*) бисульфитной ЦВВ и лабораторной НСПЦ соответствовали показателям промышленного образца НСПЦ. Более низкие значения сопротивления продавливанию и разрывная длина по сравнению с показателями лабораторных образцов объясняются особенностями моделирования стадии горячего размола на центробежно-размалывающем аппарате.

Заключение

Разработан технологический режим бисульфитной варки, позволяющий получить лиственную целлюлозу высокого выхода без ступени горячего размола. Такой полуфабрикат может быть использован в качестве альтернативы лиственной нейтрально-сульфитной целлюлозе в композиции по волокну при производстве тарного картона. Условия варки следующие: гидромодуль – 5, расход SO_2 – 15,0 %, pH варочного раствора – 4,3…4,5, продолжительность пропитки при 120 °С – 35 мин, варки при температуре 160 °С – 40 мин.

Физико-механические характеристики лиственной бисульфитной целлюлозы высокого выхода соответствуют производственным требованиям и сопоставимы с характеристиками нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы: *L* – 10 000…11 000 м, *BST* – 600…650 кПа, *CMT* – 230…245 Н, *RCT* – 200…220 Н.

Показано, что присутствие коры в щепе в количестве 7,5 % при варке целлюлозы отрицательно влияет на ее выход и механическую прочность. Для бисульфитной полуцеллюлозы снижение данных показателей в среднем составило 4,5 и 7,8 % соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Бобров А.И., Мутовина М.Г., Бондарева Т.А., Малышкина В.К.* Производство волокнистых полуфабрикатов из лиственной древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 245 с.

Bobrov A.I., Mutovina M.G., Bondareva T.A., Malyshkina V.K. *Production of Fibrous Semi-Finished Products from Hardwood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 245 p.

2. *Галеева Н.А.* Производство полуцеллюлозы и целлюлозы высокого выхода. М.: Лесн. пром-сть, 1970. 317 с.

Galeyeva N.A. *Semi-Chemical Pulp and High Yield Pulp Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1970. 317 p.

3. ГОСТ 10070–74. Целлюлоза и полуцеллюлоза. Метод определения числа Каппа. Дата введения 1975-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1999. 6 с.

State Standard. GOST 10070–74. Pulp and Semi-Pulp. Method for Determinating Kappa Number. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1999. 6 p.

4. ГОСТ 20682–75. Бумага для гофрирования. Метод определения сопротивления плоскостному сжатию гофрированного образца (СМТ). Дата введения 1976–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1989. 6 с.

State Standard. GOST 20682–75. Paper for Corrugation. Method for Determining the Resistance of Corrugated Paper to Flat Compression (Concoro Medium Test). Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1989. 6 p.

5. ГОСТ 13525.1–79. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Методы определения прочности на разрыв и удлинения при растяжении. Дата введения 1980–07–01. М.: Стандартинформ, 2007. 5 с.

State Standard. GOST 13525.1–79. Fibre Semimanufactures, Paper and Board. Tensile Strength and Elongation Tests. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 5 p.

6. ГОСТ 15815–83. Щепа технологическая. Технические условия. Дата введения 1985–01–01. М.: Изд-во стандартов, 1992. 14 с.

State Standard. GOST 15815–83. Technological Chips. Specifications. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1992. 14 p.

7. ГОСТ 13525.8–86. Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Метод определения сопротивления продавливанию. Дата введения 1988–01–01. М.: Изд-во стандартов, 2007. 6 с.

State Standard. GOST 13525.8–86. Fibre Intermediate Products, Paper and Board. Method for Determination of Resistance to Bursting. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 6 p.

8. ГОСТ 10711–97. Бумага и картон. Метод определения разрушающего усилия при сжатии кольца (RCT). Дата введения 2003–01–01. М.: Изд-во стандартов, 2003. 6 с.

State Standard. GOST 10711 – 97. Paper and Board. Method for Determination of Breaking Force by Ring Compression (RCT). Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2003. 6 p.

9. *Дьякова Е.В.* Влияние характеристик волокон и их относительного содержания в бумажной массе на деформационные и прочностные свойства тарного картона: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2004. 19 с.

D'yakova E.V. *Influence of Characteristics of Fibers and Their Relative Content in the Paper Pulp on the Deformation and Strength Properties of Containerboard*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2004. 19 p.

10. *Лавров И.В.* Совершенствование технологии бумаги для гофрирования на основе композиции первичных и вторичных волокон: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2012. 20 с.

Lavrov I.V. *Improving the Technology of Paper for Corrugation Based on the Composition of Primary and Secondary Fibers*: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs. Arkhangelsk, 2012. 20 p.

11. *Непенин Н.Н.* Технология целлюлозы: в 3 т. / под ред. Ю.Н. Непенина. Т. 1: Производство сульфитной целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 624 с.

Nepinin N.N. *Technology of Pulp*: in 3 Vol. Ed. by N.N. Nepinin. Vol. 1: Production of Sulfite Pulp. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 624 p.

12. *Непенин Ю.Н., Жалина В.А., Курятников А.Б.* Сравнительная оценка различных способов производства полуцеллюлозы из лиственной древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 1987. № 1. С. 75–78.

Nepenin Yu.N., Zhalina V.A., Kuryatnikov A.B. Comparative Evaluation of Different Methods of Hardwood Semichemical Pulp Production. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1987, no. 1, pp. 75–78. URL: http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1987/№1-1987.pdf

13. *Непенин Ю.Н., Жалина В.А., Кенин В.Г., Курятников А.Б.* Современные способы производства полуцеллюлозы. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1985. 36 с. (Целлюлоза, бумага и картон: обзор. информ.; вып. 3).

Nepinin Yu.N., Zhalina V.A., Kenin V.G., Kuryatnikov A.B. *Modern Methods of Semichemical Pulp Production*. Moscow, VNIPIEIlesprom Publ., 1985. 36 p.

14. Annergren G., Germgård U. Sulfite Pulping: Process Aspects for Sulfite Pulping. *Appita*, 2014, no. 67, pp. 270–276.

15. Atalla R.H., Ranua J., Malcolm E. Raman Spectroscopic Studies of the Structure of Cellulose: A Comparison of Kraft and Sulfite Pulps. *Tappi Journal*, 1984, vol. 67, no. 2, pp. 96–99.

16. Dorland R.M., Leask R.A., Mckinney J.W. Pulp Production with Sodium Bisulfite: The Cooking of Spruce. *Pulp and Paper Journal*, 1958, no. 10, pp. 236–237.

17. FAOSTAT. *Materials of the Official Site of the Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Available at: http://www.fao.org/faostat/en/#home (accessed 03.03.20).

18. Lundberg U. The European Containerboard Market. *Paper 360°*, 2020. Available at: https://paper360.tappi.org/2018/09/25/the-european-containerboard-market/ (accessed 03.03.20).

19. Santos R.B., Hart P.W. Effect of Eucalyptus Bark Contamination during Pulping of Mixed Southern Hardwoods. *Tappi Journal*, 2016, vol. 15, no. 11, pp. 707–715. DOI: https://doi.org/10.32964/TJ15.11.707

20. Tripathi S.K., Alam I., Bhardwaj N.K. Effect of Bark Content in Mixed Hardwood Chips on Pulp and Papermaking Properties. *Nordic Pulp & Paper Research*, 2020, vol. 35, iss. 3, pp. 235–331. DOI: https://doi.org/10.1515/npprj-2020-0017

21. Yorston F.N. Studies on Sulfite Pulping. *Dominion Forest Service Bulletin*, 1942, no. 97, pp. 20–29.

PRODUCTION OF HIGH-YIELD HARDWOOD PULP BY BISULFITE COOKING

Tatiana A. Koroleva*[1,2]*, *Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*
ResearcherID: ABB-5651-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9477-5864
Lyubov A. Milovidova*[1]*, *Candidate of Engineering, Leading Engineer of Research Planning and Support Department; ResearcherID: AAH-5551-2021,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8035-5300
Andrey A. Dryakhlitsyn*[1]*, *Engineer of Research Planning and Support Department;*
ResearcherID: AAH-5772-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8218-8569
[1]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: tataak@mail.ru, l.milovidova@narfu.ru
[2]N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 23, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation; e-mail: tataak@mail.ru

Abstract. The article presents the results of the development of a technological mode for obtaining bisulfite hardwood pulp of high yield on a magnesium base for the production of various types of containerboard. The reliable and effective chemical and heat recovery technology implemented in the bisulfite method allows to use it in independent sulfite process. The effect of the duration of stay at the final temperature on the pulp yield and kappa number was studied when developing the technological mode of cooking. It was found that the increase in the duration of stay at the final temperature of 160 °C more than 40 min leads to violations of the selectivity of the cooking process. Increasing the duration of stay at the final temperature up to 70 min is accompanied by a decrease in pulp yield by 6 % at a constant value of the kappa number of the semi-finished product. Technological cooking mode: hydromodule 5, SO_2 consumption 15.0 %, cooking solution pH 4.3–4.5, impregnation time at 120 °C – 35 min, cooking duration at 160 °C – 40 min. The mode allows to get a semi-finished product with a high yield of 60–65 % with a kappa number of 58–60 units without a hot grinding stage. An assessment of the mechanical strength characteristics of the laboratory samples of bisulfite pulp was carried out in accordance with the standards of the Russian Federation. The obtained values of bursting strength, resistance to flat compression, breaking strength, and breaking stress were comparable with the values of the industrial sample of hardwood neutral sulfite semi-chemical pulp with a semi-finished

product yield of 75–78 %. It is shown that the presence of bark in the technological chips in the amount of 7.5 % is accompanied by a decrease in the yield of bisulfite hardwood pulp by 4.5 % and mechanical strength by 7.8 %.
For citation: Koroleva T.A., Milovidova L.A., Dryakhlitsyn A.A. Production of High-Yield Hardwood Pulp by Bisulfite Cooking. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 161–169. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-161-169
Funding: The research was carried out at the Innovative facilities Engineering and Innovation Center "Advanced Northern Bioresources Processing Technologies" of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia.

Keywords: hardwood, bisulfite pulp, technological process, pulp properties, neutral sulfite pulp, containerboard, fluting.

Поступила 03.03.20 / Received on March 3, 2020

УДК 634.0.813.2
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-170-185

УГЛЕВОДОРОДЫ И СЛОЖНЫЕ ЭФИРЫ ЭКСТРАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ХВОИ ЛИСТВЕННИЦЫ СИБИРСКОЙ

Д.С. Миксон, ассистент; *ResearcherID: AAK-1624-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7828-2966*
В.И. Рощин, д-р хим. наук, проф.; *ResearcherID: AAK-4435-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5410-9496*
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; e-mail: ms.mikson@mail.ru, kaf.chemdrev@mail.ru

Аннотация. Лиственница сибирская (*Larix sibirica* L.) – одна из основных промышленных пород хвойных древесных растений России. В настоящее время древесная зелень лиственницы – отход лесозаготовительного производства – используется недостаточно. Это связано с неполной изученностью состава соединений и изменчивости самого сырьевого источника в связи с опадением хвои. Цель исследования – установление состава соединений углеводородов и сложных эфиров, содержащихся в хвое лиственницы сибирской летнего и осеннего сборов. Экстрактивные вещества извлекали из древесной зелени пропанолом-2, затем, после отгонки растворителя, выделяли вещества, растворимые в петролейном эфире (40–70 ºС). Последние разделили на свободные кислоты (31,5 % для зеленой хвои и 28,0 % для желтой) и нейтральные вещества (59,8 % для зеленой и 48,1 % для желтой). Далее нейтральные вещества хроматографировали на силикагеле: углеводороды (2,43 и 3,02 %, здесь и далее процент от нейтральных веществ зеленой и желтой хвои соответственно), сложные эфиры (31,3 и 33,8 %) и триглицериды (11,70 и 6,44 %). Фракции сложных эфиров и триглицеридов подвергли щелочному гидролизу и получили кислотные составляющие сложных эфиров (9,12 и 24,80 %) и триацилглицеринов (17,43 и 26,15 %). Фракции неомыляемых соединений кроме спиртов содержали неомыляемые вещества с неизмененными значениями R_f на тонкослойной хроматографии. Фракции неомыляемых веществ хроматографировали на силикагеле, а затем дополнительно – на силикагеле с нитратом серебра. Выделенные соединения фитостеринов и некоторых углеводородов идентифицировали методом ЯМР-спектроскопии. В кислотной составляющей сложных эфиров главные компоненты линолевая и линоленовая кислоты. Группа углеводородов представлена сесквитерпенами в обоих сборах хвои. Идентифицирован новый для хвойных растений ароматический углеводород – геранил-*п*-цимен. Впервые из зелени лиственницы сибирской выделены полипренолы, структура которых по данным ЯМР-спектроскопии и масс-спектрометрии EMS отличается от полипренолов ели и сосны длиной цепи. Содержат изопренологи от 14 до 20 изопреновых звеньев в цепи молекул с преобладанием пренола-17. Выход полипренолов составил 12,8–14,9 % от нейтральных веществ желтой и зеленой хвои соответственно. Из зеленой выделены тетрациклические тритерпеновые спирты и стерины. Тритерпеновые спирты в желтой хвое не найдены.
Для цитирования: Миксон Д.С., Рощин В.И. Углеводороды и сложные эфиры экстрактивных веществ хвои лиственницы сибирской // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 170–185. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-170-185

Ключевые слова: Larix sibirica, древесная зелень, хвоя, углеводороды, сложные эфиры, жирные кислоты, геранил-*п*-цимен, полипренолы.

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

Введение

Российская Федерация на своей территории имеет более ⅓ всех мировых запасов леса – неисчерпаемого ресурса биосферы [2, 11]. Одной из основных лесообразующих и значимых для целлюлозно-бумажной промышленности и деревообработки пород в нашей стране является лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ldb.) [3]. Однако значительная часть, практически более половины биомассы древесного растения, остается неиспользуемой (в виде древесной зелени и пней – отходов лесозаготовки – а также опилок, стружки, коры) при получении продукции из древесины. В промышленном масштабе древесная зелень лиственницы не применяется для выделения биологически активных веществ в отличие от зелени сосны, ели и пихты. Данные о терпеноидной части кроны лиственницы практически отсутствуют. Вероятно, недостаточная изученность состава экстрактивных веществ древесной зелени этого растения, изменчивость состава сырья, отсутствие хвои в осенне-зимний период года могут служить причиной того, что интереса к разработке технологий переработки кроны лиственницы нет.

Древесная зелень хвойных пород является ценным сырьем для получения биологически активных продуктов и препаратов, которые применяются в лечебной и профилактической медицине, сельском хозяйстве и других отраслях промышленности [13]. Благодаря комплексному подходу можно увеличить степень использования биомассы лиственницы при переработке отходов лесозаготовок.

Цель исследования – изучить состав углеводородов и сложных эфиров нейтральных веществ зеленой и опадающей (желтой) хвои лиственницы сибирской.

Объекты и методы исследования

Древесную зелень лиственницы заготавливали в Томской области. Использовали хвою лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ldb.) разного периода вегетации. Зеленая хвоя была отобрана в июле, а желтая – в октябре. Характеристика образцов, методика наработки экстрактивных веществ и групповой состав представлены в работе [6]. Хвою экстрагировали пропан-2-олом (ИП) в аппарате Сокслета, после отгонки растворителя извлекали петролейным эфиром (ПЭ) экстрактивные вещества, которые водным гидроксидом натрия разделяли на нейтральные вещества и свободные кислоты [10]. Полученные нейтральные вещества методом колоночной хроматографии разделяли на фракции, различающиеся по полярности соединений. Хроматографическую колонку заполняли сорбентом – силикагелем фирмы «Merck» с размером зерен 40–60 мкм, элюировали соединения ПЭ, ПЭ с добавкой диэтилового эфира (ДЭ) от 2 до 50 %, затем ДЭ и этанолом.

Для контроля и качественного отбора фракций использовали метод тонкослойной хроматографии (ТСХ). В качестве эталонных соединений «метчиков» на ТСХ применяли сквален, триглицериды растительного масла, α-терпинеол, изоабиенол, полипренолы ели европейской и стерины. Хроматографические пластины проявляли парами йода в стеклянной камере, в отдельных случаях пластину дополнительно обрабатывали концентрированной серной кислотой с последующим выдерживанием в сушильном шкафу при температуре 120 °С.

Фракцию сложных эфиров, имеющую значение R_f на ТСХ меньше, чем у сквалена, и выше, чем у триглицеридов, и фракцию триглицеридов с R_f, соответствующим R_f триглицеридов растительного масла, гидролизовали спиртовым раствором щелочи (0,5М KOH в этаноле) при температуре 55–60 °С в течение 30 мин. Полученный гидролизат упаривали на ¾ от спирта, содержащегося в колбе, и разделяли по кислотно-щелочной схеме [10] на неомыляемые вещества и «связанные» кислоты.

Неомыляемые вещества сложных эфиров и триглицеридов хроматографировали на колонке с силикагелем (элюенты – ПЭ, ПЭ с градиентным увеличением ДЭ от 1 до 50 %, ДЭ, ИП) для выделения спиртов – продуктов щелочного гидролиза сложных эфиров – и компонентов, которые не изменили значение R_f на ТСХ после проведения гидролиза. Отдельные фракции, обогащенные основными соединениями, такие как тритерпеновые спирты, перевели в ацетаты для качественного их разделения при повторной хроматографии. Для ацетилирования использовали смесь пиридина и уксусного ангидрида в пропорции 2:1 соответственно [1]. После ацетилирования фракции на ТСХ были видны пятна ацетатов, значения R_f которых оказались близки по отношению друг к другу. Ацетаты хроматографировали на колонке с силикагелем, импрегнированным 10 %-й добавкой $AgNO_3$.

Кислотную составляющую сложных эфиров и триглицеридов – связанные кислоты – метилировали диазометаном и анализировали с помощью хроматомасс-спектрометрии.

Для идентификации соединений применяли инструментальные методы анализа. Спектры ЯМР ^{1}H и ^{13}C индивидуальных соединений записывали на приборе JEOL JNM – ECX 400A (для ^{1}H – 399,9 МГц, ^{13}C – 100,0 МГц) в растворе $CDCl_3$, δ шкала. Исследуя фракции, использовали хроматомасс-спектрометр с газовым хроматографом Agilent Technologies 6850A и квадрупольным масс-спектрометром Agilent Technologies 5973N, стандартную кварцевую капиллярную колонку HP-5MS длиной 30 м и внутренним диаметром 0,25 мм, толщина пленки неподвижной фазы – 0,25 мкм. Разделение потока 1:100. Температурный режим колонки: программирование температуры со скоростью 5 °С/мин от 60 до 280 °С для фракций углеводородов; для метиловых эфиров кислот – от 150 до 280 °С, для фракций неомыляемых веществ – от 100 до 280 °С. Дозируемый объем пробы – 0,1 мкл. Идентификацию соединений проводили сравнением масс-спектров, полученных на хроматограмме пиков, с масс-спектрами известных соединений по сведениям баз данных WILLEY, NIST и [12]. Для анализа полипренолов использовали масс-спектрометрию высокого разрешения MS TOF HR (EIS).

Полипренолы: вязкое нелетучее вещество, светло-желтого цвета, спектр ПМР, δ шкала, $CDCl_3$: 1,5930 м.д. и 1,6060 м.д. – синглеты на 3H и 6H, метил концевой изопропиледеновой группы в *транс*-конфигурации и метилы двух внутренних изопреновых звеньев у атома углерода трехзамещенных двойных связей в *транс*-конфигурации соответственно; 1,6761 м.д. – синглет на 44H, 14-15 метильных групп у атомов углерода внутренних трехзамещенных двойных связей и концевой изопропиледеновой метильной группы в *цис*-конфигурации; 1,7427 м.д. – синглет на 3H, метильная группа у атома углеро-

да трехзамещенной двойной связи изопентинильного звена с ОН-группой; 2,0366 м.д. – синглет на 69Н – CH_2-группы изопентинильных звеньев цепи молекулы; 4,0922 м.д.– дублет дублетов J = 2,0 и J = 8,0 Гц на 2Н, протоны у атома С, связанного с ОН-группой; 5,1194 м.д. – широкий синглет на 17Н, протоны у атомов углерода трехзамещенных двойных связей изопентинильных звеньев; 5,443 м.д. – триплет дублетов J = 2,0 и J = 8,0 Гц, 1Н, протон у атома углерода трехзамещенной двойной связи изопентинильной группы – $C(CH_3) = CH\text{-}CH_2OH$.

3-Карен: спектр ПМР, δ шкала, $CDCl_3$: 0,7588 м.д. и 1,0206 м.д., по 3Н каждый, протоны метильных групп у атома углерода циклопропанового кольца; 1,5962 м.д., 3Н – синглет, протоны метильной группы у атома углерода трехзамещенной двойной связи циклогексенового кольца; триплет дублетов с центром 0,6084 м.д. (J = 8,0 : J = 4,0 : J = 0,4 Гц) на 1Н и 0,7134 м.д. триплет дублетов (J = 8,0 : J = 4,0 и J = 0,4 Гц) на 1Н – протоны у атомов углерода сочленения циклопропанового и циклогексенового колец; дублет с центром 1,7890 м.д. на 1Н и дублет дублетов с центром 2,1620 м.д. на 1Н – протоны метиленовой группы у атома углерода, находящегося между атомом углерода сочленения циклопропанового кольца и атомом углерода трехзамещенной двойной связи с метилом; 2 дублета с центрами 1,9381 м.д. и 2,3450 м.д. на 1Н каждый – протоны метиленовой группы у атома углерода, находящегося между атомом углерода сочленения циклопропанового кольца и атомом углерода с протоном трехзамещенной двойной связи; протон у атома углерода трехзамещенной двойной связи проявляется в виде широкого синглета с центром 5,2302 м.д. на 1Н.

Сквален: спектр ПМР, δ шкала, $CDCl_3$: 1,6064 м.д. – синглет на 18Н, протоны метильных групп у атомов углерода трехзамещенных двойных связей в *транс*-конфигурации; 1,6832 м.д. – синглет на 6Н, метильные группы у атомов углерода трехзамещенных двойных связей в *цис*-конфигурации; 1,9580 м.д. и 2,1115 м.д. – мультиплет на 20Н, внутренние метиленовые группы; мультиплет с центром 5,1214 м.д. на 6Н – протоны у атомов углерода трехзамещенных двойных связей.

Циклоартенол ацетат: спектр ПМР, δ шкала, $CDCl_3$: сигналы циклопропанового кольца проявлялись в виде дублетов на 1Н каждый с центрами 0,55 и 0,68 м.д., метильные группы в боковой цепи в виде синглетов с центрами 1,57 и 1, 68 м.д. на 3Н каждый; 4,05 м.д. – 1Н, триплет, протон у атома углерода с вторичной ацетатной группой, имеющий у соседнего атома углерода С-4 замещение метильными группами. Протон у атома углерода С-24 трехзамещенной двойной связи проявляется на спектре в виде триплета на 1Н в области 5,25 м.д.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты разделения методом колоночной хроматографии нейтральных веществ зеленой (81,4 г) и желтой (14,9 г) хвои представлены в табл. 1. Содержание углеводородов и сложных эфиров практически одинаково в обоих сборах, а уровень триглицеридов меньше в 2 раза в желтой хвое.

Таблица 1

Результаты разделения нейтральных веществ хвои лиственницы методом колоночной хроматографии

№ п/п	Элюент	Группа веществ	Содержание*	
			г	%
1	ПЭ	Углеводороды	1,98/0,45	2,43/3,02
2	ПЭ:ДЭ 99:1–96:4	Сложные эфиры	25,55/5,10	31,30/33,80
3	ПЭ:ДЭ 95:5–85:15	Триглицериды	9,50/0,96	11,70/6,44
4	ПЭ:ДЭ 85:15–75:25	Спирты	15,18/4,16	12,40/27,90
5	ПЭ:ДЭ 75:25	Стерины	6,28/1,50	7,70/10,06
6	ДЭ, этанол	Полиоксисоединения	21,90/2,53	26,90/16,90
Получено			80,39/14,70	98,75/98,65
Взято на разделение			81,40/14,90	100,00/100,00
Потери			1,01/0,20	1,25/1,35

* Здесь и далее, в табл. 3, 5, 8, в числителе данные по зеленой хвое, в знаменателе – по желтой.

Первой из хроматографической колонки была элюирована фракция углеводородов [5]. В нее отбирались соединения, значения R_f которых выше или равны значению R_f сквалена на ТСХ. Состав соединений устанавливали методом хроматомасс-спектрометрии. Компонентный состав углеводородов нейтральных веществ хвои лиственницы сибирской приведен в табл. 2.

Таблица 2

Компонентный состав углеводородов нейтральных веществ хвои

Компонент	Содержание, % от массы фракции углеводородов	
	Зеленая хвоя	Желтая хвоя
α-Пинен	0,40	–
β-Пинен	3,21	–
3-Карен	3,90	–
п-Цимен	Следы*	–
α-Иланген	Следы	3,93
β-Бурбонен	1,49	5,23
β-Кубебен	Следы	2,95
Лонгифолен	1,64	Следы
Кариофиллен	2,16	5,62
Изокариофиллен	2,47	–
β-Фарнезен	Следы	–
Гумулен	0,80	–
ɣ-Муролен	17,20	15,86
Гермакрен-D	Следы	9,13
β-Селинен	0,90	–

Окончание табл. 2

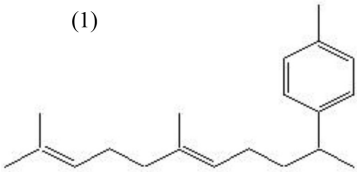
Компонент	Содержание, % от массы фракции углеводородов	
	Зеленая хвоя	Желтая хвоя
цис,*транс*-α-Фарнезен	Следы	–
α-Муролен	Следы	6,02
β-Бизаболен	0,05	–
ɣ-Кадинен	13,90	13,60
δ-Кадинен	Следы	10,30
α-Кадинен	7,90	3,06
α-Калокарен	–	7,30
Кариофиллен оксид	2,43	2,55
Сандаракопимарадиен	1,30	–
18-Норабиета-8,11,13-триен	2,10	–
Дегидроабиетан	0,80	–
Изопимарадиен	Следы	2,05
Геранил-*п*-цимен	0,40	–
Эйкозан	0,01	Следы
Доэйкозан	Следы	–
Триэйкозан	Следы	3,82
Тетраэйкозан	Следы	2,61
Сквален	9,10	Следы

* Здесь и далее, в табл. 4, следы – содержание компонента от массы фракции составляет менее 0,01 %.

Полученные данные свидетельствуют о том, что зеленая хвоя существенно отличается от желтой по составу соединений углеводородной фракции. В первой были идентифицированы монотерпены, из них доминирующий компонент – 3-карен, что является отличительной особенностью лиственницы сибирской. Высокое содержание данного компонента было отмечено ранее в работах [7, 14, 19], где сообщалось о преобладании 3-карена в коре ветвей, живице и эфирном масле лиственницы. Монотерпены в желтой хвое не идентифицированы, на хроматограмме отсутствовали.

Основная группа углеводородов относится к сесквитерпенам, содержание которых в зеленой хвое составило 50,6 % от суммы фракции углеводородов, что на 30 % ниже, чем в аналогичной группе углеводородов в желтой хвое (85,7 %).

(1)



В зеленой хвое идентифицирован неизвестный ранее для хвойных растений ароматический дитерпеновый углеводород – геранил-*п*-цимен (1). Масс-спектр, m/z (%): M^+– 270 (2), 227 (10), 185 (2), 159 (10), 145 (49), 132 (75), 119 (100), 105 (30). Его содержание составило всего 0,4 % от массы фракции углеводородов зеленой хвои, поэтому спектральные характеристики не определялись. Можно высказать предположение об образовании данного соединения путем циклизации и последующей ароматизации биогенетического предшественника всех дитерпеноидов – геранилгеранилпирофосфата [8].

В литературных источниках найдены данные об идентификации (выделении) геранил-*n*-цимена из эфирных масел листьев тропических пород (*Calaminta pamphylia*, *Montanoa guatemalensis*) [15, 17] и листьев канадского бука [20]. Масс-спектр выделенного геранил-*n*-цимена из канадского бука [20] и масс-спектр идентифицированного углеводорода в хвое лиственницы тождественны. Сообщений о наличии данного углеводорода в других частях биомассы лиственницы или других хвойных деревьях не обнаружено.

Дитерпеновые углеводороды в зеленой хвое были представлены также 18-норабиета-8,11,13-триеном, сандаракопимарадиеном, дегидроабиетаном и изопимарадиеном. В желтой среди группы дитерпенов идентифицирован только изопимарадиен в количестве 2,05 % от массы фракции.

Хвою от других частей кроны лиственницы сибирской отличает отсутствие в составе углеводородов цембрановых соединений [9]. Их высокое содержание определено в коре [14] лиственницы. Тритерпеновые углеводороды представлены скваленом только в составе зеленой хвои, в желтой сквален найден в следовых количествах.

Фракция сложных эфиров элиюрована из хроматографической колонки после фракции углеводородов и включает наибольшую часть от нейтральных веществ: 31,3 % – в зеленой хвое, 33,8 % – в желтой. Как правило, сложные эфиры древесной зелени содержат в себе наименее полярные кислородсодержащие компоненты, такие как ацетаты полипренолов, эфиры, состоящие из высших жирных кислот и тритерпеновых спиртов, стеринов.

Анализ группового состава фракции сложных эфиров (табл. 3) зеленой и желтой хвои показал, что в зеленой хвое больше неомыляемых веществ (86,1 % от массы фракции сложных эфиров) в сравнении с желтой (63,5 %), но меньше доля связанных кислот – в 2,7 раза.

Таблица 3

Групповой состав фракции сложных эфиров хвои лиственницы

Группа веществ	Выход, г	Содержание, % от фракции сложных эфиров
Неомыляемые вещества	21,99/3,23	86,09/63,50
Связанные кислоты	2,33/1,26	9,12/24,80
Суммарный выход	24,30/4,50	95,20/88,30
Взято на разделение	25,55/5,09	100,00/100,00
Потери	1,20/0,60	4,80/11,70

Связанные кислоты после метилирования анализировали методом хромато-масс-спектрометрии. Состав представлен в табл. 4.

Таблица 4

Состав связанных кислот сложных эфиров зеленой и желтой хвои

Кислота	Содержание, % от фракции связанных кислот	
	Зеленая хвоя	Желтая хвоя
Додекановая	Следы	Следы
Тетрадекановая	4,40	4,24
7,10,13-Гексадекатриеновая	–	2,39
Пальмитиновая	14,62	15,02
14-Метилпальмитиновая	Следы	1,47

Окончание табл. 4

Кислота	Содержание, % от фракции связанных кислот	
	Зеленая хвоя	Желтая хвоя
5,9,12-Октадекатриеновая	5,80	–
6,9,12,15-Октадекатетраеновая	4,97	–
Линолевая	25,47	4,23
Линоленовая	36,72	26,14
Стеариновая	1,85	3,07
5,11,14-Эйкозатриеновая	2,81	3,69
5,11,14,17-Эйкозатетраеновая	–	2,57
Эйкозановая	Следы	5,27
Дегидроабиетиновая	Следы	–
Бегеновая	Следы	4,78
Трикозановая	Следы	2,61
Тетракозановая	2,02	5,25
Гексакозановая	–	2,97

Зеленая хвоя лиственницы сибирской содержит больше ненасыщенных высших жирных кислот, чем желтая (более 75 % и около 40 % от суммы фракции кислот соответственно). Среди них пальмитиновая кислота (14–15 % в обоих сборах) – основная. Линолевая и линоленовая кислоты, составляющие свыше 60 % в зеленой и около 31 % в желтой хвое, являются незаменимыми полиненасыщенными жирными кислотами основного обмена, компонентами плазматических мембран клеток и внутриклеточных органелл [16]. Эйкозановые кислоты [4, 18] – предшественники групп простагландинов и лейкотриенов – это, в свою очередь, предшественники арахидонового каскада и регуляторы клеточного метаболизма и иммунитета организма млекопитающих.

Неомыляемые вещества по данным ТСХ состояли из нескольких групп спиртовой составляющей сложных эфиров – спиртов и соединений, которые не изменили значения R_f на ТСХ после проведения гидролиза.

Неомыляемые вещества (21,99 г из зеленой хвои и 3,23 г из желтой) разделили методом колоночной хроматографии (табл. 5) на 4 основные фракции. Фракция А состояла из соединений, которые после омыления не изменили значения R_f на ТСХ, и включала в себя альдегиды, метиловые эфиры смоляных кислот, спирты. Анализировали фракцию методом хроматомасс-спектрометрии.

Таблица 5

Результаты разделения неомыляемых веществ сложных эфиров

Фракция	Элюент ПЭ:ДЭ	Содержание, % от		Метод идентификации
		неомыляемых веществ	нейтральных веществ	
А	95:5–90:10	25,90/11,12	6,75/2,33	ГХ-ХМ
Б(1)	90:10	1,08/–	0,28/–	–*
Б	88:12–86:14	55,07/60,80	14,90/12,82	ЯМР
В	88:12–86:14	–/12,80	–/2,61	ЯМР
Г	80:20–70:30	16,98/13,68	2,47/2,88	ГХ-ХМ, ЯМР

* Анализ не проводился.

На хроматограмме неомыляемых веществ фракции А желтой хвои присутствовало 13 пиков, 6 из них удалось идентифицировать с вероятностью выше 95 %: метилдегидроабиетат – 0,08 % (здесь и далее процент от неомыляемых веществ), дегидроабиетиналь – 0,08 %, 2-пентакозанон-10 – 0,06 %, 1-метокси-24-метилгептакозан – 0,16 %, нонакозанон-10 – 0,28 %, α-токоферол (витамин Е) – 0,34 %. Около 60 % веществ данной фракции осталось не определено. По характеру распада молекул и осколочным ионам предполагается, что это альдегиды и алифатические спирты. Состав аналогичной фракции зеленой хвои отличается от состава желтой (табл. 6) наличием оксидов – эпиманоилоксида и маноилоксида. Токоферол, вероятно, находился в данной фракции в виде ацетата.

Таблица 6

Состав неомыляемых веществ фракции А сложных эфиров зеленой хвои

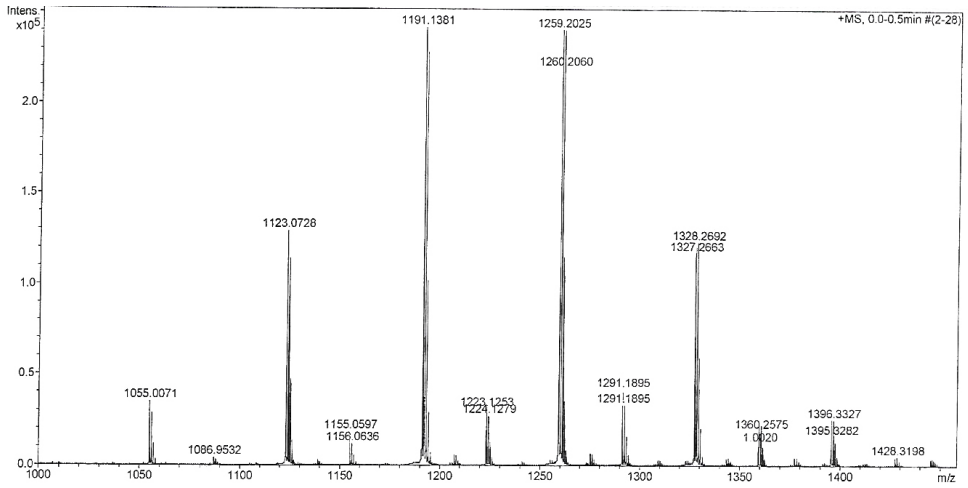
Компонент	Содержание, % от неомыляемых веществ
α-Ионон	0,06
β-Ионон	0,07
Маноилоксид	0,55
Эпиманоилоксид	0,20
Т-муролол	0,15
Пимариналь	0,72
Сандаракопимариналь	0,56
Дегидроабиетиналь	0,50
3-Кето-изопимарадиен	0,80
Октакозанол	1,01
Эйкозанол	0,33
Метилдегидроабиетат	2,50
Метилабиетат	1,43
Неидентифицированные компоненты	17,40

Фракция Б по данным ТСХ состояла из одного компонента, значение R_f которого совпадало со значением R_f полипренолов из ели. Строение полипренолов лиственницы устанавливали методами ЯМР-спектроскопии и TOF-EMS-спектрометрии (в качестве «метчиков» использовали полипренолы из ели известного состава).

Исходя из данных, полученных по ЯМР-спектру и соотношению интегральных кривых сигналов при 5,4430 и 5,1194 м.д., можно предположить, что основными пренолами являются соединения с 16–18 изопреновыми звеньями, в то время как полипренолы ели состоят из 10–17 изопреновых звеньев в цепи молекулы с преобладанием 14–16 изопреновых звеньев в цепи молекул: пренол-14, пренол-15, пренол-16, – составляющих более 70 % от массы полипренолов. В литературе не найдено сведений о полипренолах хвои лиственницы сибирской.

Результаты анализа методом масс-спектрометрии высокого разрешения фракций полипренолов из известного препарата «Ропрен» и фракции полипре-

нолов лиственницы сибирской (см. рисунок) в виде их триэтиламинных производных показали близкие массовые числа соответствующих пренолов с шагом 68,040–68,068 м.е. между соседними компонентами фракций. На масс-спектре между сигналами основных компонентов фракции есть сигналы с массовыми числами на 31,987 выше, чем у основных компонентов, и шагом, одинаковым с шагом между основными компонентами – около 68,066 м.е. Так как анализ фракций полипренолов в виде триэтиламинных производных проводился с присадкой метанола, можно предположить, что увеличение сигнала с массовыми числами на 31,987 по сравнению с основными компонентами, связано с образованием комплекса – производные полипренолов с метанолом.



Масс-спектр производных полипренолов, выделенных из хвои лиственницы сибирской

Mass-spectrum of derivatives of polyprenols isolated from Siberian larch needles

Суммируя данные ЯМР-спектроскопии и масс-спектрометрии, результаты ТСХ с ацетатами и свободными полипренолами из ели, можно утверждать, что полипренолы хвои лиственницы сибирской состоят из ацетатов, как и в других видах хвойных (ель, сосна, пихта), и содержат изопренологи – 14…20 изопреновых звеньев в цепи молекул с преобладанием пренола-17 (31,6 %), пренола-16 (29,6 %), составляющих более половины фракции. Треть ее представляют пренолы-15 (15,8 %) и -18 (14,6 %); пренолы-14 (4,4 %), -19 (3,2 %) и -20 (1,0 %) в сумме составляют менее 10 %. Содержание изопренологов во фракции полипренолов рассчитано методом нормализации по соотношению высот сигналов соответствующих компонентов.

Пренолы хвои лиственницы сибирской, как и известные пренолы других хвойных России, содержат 2 концевых внутренних изопреновых звена с *транс*-конфигурацией двойных связей, концевое звено с гемдиметильной группой у атома углерода трехзамещенной двойной связи, остальные изопреновые звенья – от 11-го (пренол-14) до 17-го (пренол-20) – имеют *цис*-конфигурацию двойных связей.

Фракция Г зеленой хвои, по данным масс-спектров, состояла из тритерпеновых спиртов и стеринов. Тритерпеновые спирты ацетилировали и хроматографировали на колонке с серебром. Были выделены как индивиду-

альные соединения, так и фракции, обогащенные основным соединением (табл. 7). Фракцию стеринов перекристаллизовали в этилацетате. В кристаллической части, по данным масс- и ЯМР-спектрометрии, содержался чистый ситостерин, а в маточнике – остатки ситостерина с кампестерином. Структуры всех выделенных фитостериновых соединений подтверждены ЯМР-спектрами.

Таблица 7

Выделенные тритерпеновые спирты и стерины фракции Г зеленой хвои

Компонент	Содержание, % от фракции Г	Метод идентификации
Циклоартенол	6,82	ГХ-МС, ЯМР
Циклоэвкаленол	0,09	ЯМР
Обтузифолиол	0,01	ЯМР
24-Метиленциклоартанол	6,75	ГХ-МС, ЯМР
Цитрастадиенол	7,69	ЯМР
Метиллофенол	1,84	ЯМР
24-Метиленлофенол	0,10	ЯМР
Кампестерин	0,33	ГХ-МС, ЯМР
β-Ситостерин	7,18	ГХ-МС, ЯМР
Сумма	30,81	–

Хроматограмма фракции Г желтой хвои показала пики, соответствующие стериновым спиртам: кампестерин (2,31 %, здесь и далее процент от массы фракции Г желтой хвои) и β-ситостерин (88,2 %) в качестве основных компонентов фракции. Также идентифицированы транс-геранилгераниол – 1,87 %, фитол – 6,36 % и нонакозанол-10 – 1,26 %. Тритерпеновые спирты не были обнаружены. Возможно, это связано с тем, что хвоя в период апоптоза прекращает биосинтез тритерпеноидов – предшественников стеринов. Эту гипотезу можно обьяснить наличием в побегах обычных для растений стеринов – кампестерина и ситостерина.

Фракцию триглицеридов аналогично фракции сложных эфиров омылили, разделили на неомыляемые веществ и связанные кислоты. Результаты представлены в табл. 8. Доля кислот в триглицеридах составляет около 90 %, а глицерин при щелочном гидролизе переходит в водную часть гидролизата и не выделяется, что подтверждается данными по выходам после проведения анализа группового состава фракции.

Таблица 8

Групповой состав фракции триглицеридов зеленой и желтой хвои

Группа веществ	Выход, г	Содержание, % от фракции триглицеридов
Неомыляемые вещества	5,17/0,58	49,23/60,01
Связанные кислоты	1,83/0,25	17,43/26,15
Суммарный выход	6,99/0,83	66,66/86,16
Взято на разделение	10,50/0,96	100,00/100,00
Потери	3,50/0,13	33,33/13,84

Кислотная составляющая (табл. 9) фракции триглицеридов зеленой и желтой хвои различна.

Таблица 9

Состав кислот триглицеридов зеленой и желтой хвои

Кислота	Содержание, % от фракции триглицеридов	
	Зеленая хвоя	Желтая хвоя
Нонадекановая	–	1,12
Додекановая	–	Следы
Тетрадекановая	–	4,80
7,10,13-Гексадекатриеновая	3,41	2,17
Гексадекановая	8,65	7,80
6,9,12-Октадекатриеновая	1,37	2,65
Линолевая	18,96	7,01
Линоленовая	32,31	16,24
Олеиновая	27,15	48,12
Стеариновая	0,02	0,82
5,11,14-Эйкозатриеновая	1,33	–
5,8,11,14,17-Эйкозапентаеновая	–	3,60
Эйкозановая	0,36	3,22
Докозановая	0,43	1,01
Тетракозановая	0,78	0,64
Не идентифицирована	0,90	0,20
Гексакозановая	0,61	0,66
Не идентифицирована	0,50	–
Октакозановая	0,55	–
Триэйконтановая	1,61	–

Преобладающими кислотами в зеленой хвое являются линолевая, линоленовая и олеиновая, которые в сумме составляют 78,5 % от массы связанных кислот. При этом содержание олеиновой кислоты возрастает в 2 раза в желтой хвое по сравнению с зеленой, но падают уровни линолевой и линоленовой кислот в аналогичной зависимости.

Состав неомыляемых веществ фракции триглицеридов зеленой хвои представлен в табл. 10.

Таблица 10

Состав неомыляемых веществ фракции триглицеридов зеленой и желтой хвои

Компонент	Содержание, % от неомыляемых веществ	
	Зеленая хвоя	Желтая хвоя
Т-муролол	0,90	1,00
Изолонгифолол	3,40	3,00
Фитол	1,70	11,70
Гептакозанол-10	5,50	4,50
Нонакозанол-10	62,40	31,30
α-Токоферол	16,60	7,70
β-Ситостерин	10,40	3,04

Состав неомыляемой части триглицеридов зеленой хвои идентичен составу желтой, за исключением соотношения компонентов. Так, в зеленой хвое преобладающими компонентами являются нонакозанол-10, токоферол и ситостерин, содержание которых уменьшается практически в 2 раза в желтой. В ней в 7 раз по сравнению с зеленой хвоей увеличивается уровень фитола.

Заключение

Изучен состав фракций углеводородов и сложных эфиров нейтральной части экстрактивных веществ, растворимых в петролейном эфире, зеленой и желтой хвои лиственницы сибирской. Фракция углеводородов представлена в основном сесквитерпеновыми углеводородами кадинанового и муроланового типов, которые составили 50,6 % (зеленая) и 85,7 % (желтая хвоя) от суммы углеводородов соответствующих сборов. В группе монотерпенов зеленой хвои основные компоненты 3-карен (3,91 %) и β-пинен (3,21 %), в желтой монотерпены не выявлены.

Идентифицирован новый дитерпеновый ароматический углеводород – геранил-*п*-цимен, о наличии которого в хвойных древесных растениях ранее не сообщалось. Вероятнее всего, он образуется из геранилгеранилпирофосфата и является вторым типом ароматических дитерпенов после известных дегидроабиетанов хвойных.

Состав сложных эфиров зеленой и желтой хвои различен. Впервые выделена группа полипренолов, которая составляет 12–14 % от нейтральных веществ. Структура полипренолов и состав изопренологов установлены с использованием инструментальных методов анализа, основные изопренологи – пренол-17 (31,6 %) и пренол-16 (29,6 %). Выделены ситостерин и кампестерин – стерины преобладающие в хвойных растениях. В зеленой хвое идентифицированы тритерпеновые соединения – промежуточные метаболиты в биосинтезе стеринов.

В составе связанных кислот фракций триглицеридов зеленой и желтой хвои основными кислотами являются олеиновая, линолевая и линоленовые кислоты. Содержание первой в желтой хвое практически в 2 раза выше, чем в зеленой; второй и третьей – в 2 раза меньше. Неомыляемая часть триглицеридов представлена алифатическими спиртами: нонакозанол-10 и гептакозанол-10. Суммарно они составляют 68 % от неомыляемых веществ в зеленой хвое и 35,8 % в желтой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Беккер Х., Беккерт Р., Бергер В.* Органикум: в 2 т. Т. 1. М.: Мир: БИНОМ, 2008. 504 с.

Bekker H., Bekkert R., Berger W. *Organicum*: In 2 Vol. Vol. 1. Moscow, Mir Publ., 2008. 504 p.

2. *Бобров Е.Г.* Лесообразующие хвойные СССР. Л.: Наука, 1978. 189 с.

Bobrov E.G. *Forest-Forming Conifers of the USSR*. Leningrad, Nauka Publ., 1978. 189 p.

3. *Дылис Н.В.* Сибирская лиственница: Материалы к систематике, географии и истории. М.: Изд. МОИП, 1947. 137 с.

Dylis N.V. *Siberian Larch: Materials on Systematics, Geography and History*. Moscow, MOIP Publ., 1947. 137p.

4. *Караман Ю.К., Лобанова Е.Г.* Эндоканнабиноиды и эйкозаноиды: биосинтез, механизмы их взаимосвязи, роль в иммунных процессах // Медицинская иммунология. 2013. Т. 15, № 2. С. 119–130.

Karaman Yu.K., Lobanova E.G. Endocannabinoids and Eicosamoids: Biosynthesis and Interactions with Immune Response. *Meditsinskaya immunologiya* [Medical Immunology], 2013, vol. 15, no. 2, pp. 119–130. DOI: https://doi.org/10.15789/1563-0625-2013-2-119-130

5. *Миксон Д.С., Рощин В.И.* Углеводороды нейтральных веществ хвои лиственницы сибирской разного периода вегетации // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы VII Всерос. конф. с междунар. участием Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2017. С. 223–224.

Mikson D.S., Roshchin V.I. Hydrocarbons of Neutral Substances of Siberian Larch Needles of Different Vegetation Periods. *New Advances in Chemistry and Chemical Technology of Plant Raw Materials: Proceedings of the VII All-Russian Conference with International Participation*. Barnaul, ASU Publ., 2017, pp. 223–224.

6. *Миксон Д.С., Рощин В.И.* Групповой состав и кислоты хвои лиственницы сибирской разного периода вегетации // Химия растительного сырья. 2019. № 4.С. 207–214.

Mikson D.S., Roshchin V.I. The Siberian Larch Group Composition and Acid Needles at Different Vegetation Periods. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja* [Chemistry of plant raw material], 2019, no. 4, pp. 207–214. DOI: https://doi.org/10.14258/jcprm.2019045477

7. *Пентегова В.А., Дубовенко Ж.В., Ралдугин В.А., Шмидт Э.Н.* Терпеноиды хвойных растений. Новосибирск: Наука, 1987. 97 с.

Pentegova V.A., Dubovenko Zh.V., Raldugin V.A., Shmidt E.N. *Terpenoids of Coniferous Plants*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 97p.

8. *Племенков В.В.* Введение в химию природных соединений. Казань, 2001. 376 с.

Plemenkov V.V. *Introduction to the Chemistry of Natural Compounds*. Kazan, 2001. 376 p.

9. *Ралдугин В.А., Коротких Л.Я., Ярошенко Н.И., Пентегова В.А.* Регио- и стереоселективное окисление цембрена двуокисью селена // Химия природных соединений. 1978. № 3. С. 410–411.

Raldugin V.A., Korotkikh L.Ya., Yaroshenko N.I., Pentegova V.A. Regio- and Stereo-Selective Oxidation of Cementene with Selenium Dioxide. *Khimiya Prirodnykh Soedinenii* [Chemistry of Natural Compounds], 1978, no. 3, pp. 410–411.

10. *Рощин В.И., Баранова Р.А., Белозерских О.А., Соловьев В.А.* Состав экстрактивных веществ хвои и побегов ели европейской // Химия древесины. 1983. № 4. С. 56–61.

Roshchin V.I., Baranova R.A., Beloozerskikh O.A., Solov'yev V.A. Composition of Extractive Substances of Needles and Shoots of Norway Spruce. *Wood chemistry*, 1983, no. 4, pp. 56–61.

11. *Рысин Л.П.* Хвойные леса России // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2012. Т. 14, № 1(4). С. 1106–1109.

Rysin L.P. Conifer Forests of Russia. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, vol. 14, no. 1(4), pp. 1106–1109.

12. *Ткачев А.В.* Исследование летучих веществ растений. Новосибирск: Офсет, 2008. 969 с.

Tkachev A.V. *Study of Volatile Substances of Plants.* Novosibirsk, Ofset Publ., 2008. 969 p.

13. *Томчук Р.И., Томчук Г.Н.* Древесная зелень и ее использование в народном хозяйстве. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 360 с.

Tomchuk R.I., Tomchuk G.N. *Woody Greens and Their Use in the National Economy*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 360 p.

14. *Трошина А.В., Рощин В.И.* Углеводороды нейтральных веществ коры ветвей лиственницы сибирской // Изв. РАН. Сер.: Химическая. 2014. № 9. С. 2160–2168.

Troshina A.V., Roshchin V.I. Hydrocarbons of Neutral Substances from the Branch Bark of Siberian Larch. *Izvestiya akademii nauk. Seriya khimicheskaya* [Russian Chemical Bulletin], 2014, no. 9, pp. 2160–2168. DOI: https://doi.org/10.1007/s11172-014-0714-4

15. Alan S., Kürkçüoğlu M., Başer K.H.C. The Composition of the Essential Oils of *Calamintha pamphylica* Subspecies. *Turkish Journal of Biology*, 2011, vol. 35, no. 2, pp. 259–265. DOI: https://doi.org/10.3906/biy-0806-12

16. Calder P.C. Very Long-Chain *n*-3 Fatty Acids and Human Health: Fact, Fiction and the Future. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2018, vol. 77, iss. 1, pp. 52–72. DOI: https://doi.org/10.1017/S0029665117003950

17. Flatt V.D., Campos C.R., Kraemer M.P., Bailey B.A., Satyal P., Setzer W.N. Compositional Variation and Bioactivity of the Leaf Essential Oil of *Montanoa guatemalensis* from Monteverde, Costa Rica: A Preliminary Investigation. *Medicines*, 2015, vol. 2(4), pp. 331–339. DOI: https://doi.org/10.3390/medicines2040331

18. Layé S., Nadjar A., Joffre C., Bazinet R.P. Anti-Inflammatory Effects of Omega-3 Fatty Acids in the Brain: Physiological Mechanisms and Relevance to Pharmacology. *Pharmacological Reviews*, 2018, vol. 70(1), pp. 12–38. DOI: https://doi.org/10.1124/pr.117.014092

19. Salem M., Zeidler A., Böhm M. GC/MS Analysis of Oil Extractives from Wood and Bark of *Pinus sylvestris*, *Abies alba*, *Picea abies* and *Larix decidua*. *Bioresources*, 2016, vol. 10, no. 4, pp. 7725–7737. DOI: https://doi.org/10.15376/biores.10.4.7725-7737

20. Silk P.J., Mayo P.D., LeClair G., Brophy M., Pawlowski S., MacKay K., Hillier N.K., Hughes C., Sweeney J.D. Semiochemical Attractants for the Beech Leaf-Mining Weevil, *Orchestes fagi*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2015, vol. 164, iss. 2, pp. 102–112. DOI: https://doi.org/10.1111/eea.12603

HYDROCARBONS AND ETHERS OF EXTRACTIVE SUBSTANCES OF SIBERIAN LARCH NEEDLES

Darya S. Mikson, *Assistant; ResearcherID: AAK-1624-2020,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7828-2966
Viktor I. Roshchin, *Doctor of Chemistry, Prof.; ResearcherID: AAK-4435-2020,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5410-9496
Saint Petersburg State Forest Technical University, Institutskiy per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation; e-mail: ms.mikson@mail.ru, kaf.chemdrev@mail.ru

Abstract. Siberian larch (*Larix sibirica* L.) is the main commercial species in Russia. Currently, larch woody greens are underutilized. They are considered a waste product from logging. This is due to the lack of knowledge on the composition of compounds and the variability of the raw material source itself as a result of the fall of the needles. The research purpose is to study the composition of hydrocarbons and esters from Siberian larch needles in summer and autumn collection from the Tomsk region. The shredded needles were extracted with propan-2-ol; then, after distillation of the solvent, substances soluble in petroleum ether (PE, 40–70 °C) were isolated. The latter were divided into free acids (31.5 % for green needles and 28.0 % for yellow needles) and neutral substances (59.8 and 48.1 %, respectively). Then, neutral

substances were chromatographed on silica gel: hydrocarbons (2.43 and 3.02 %, hereinafter from neutral substances of green and yellow needles, respectively), esters (31.30 and 33.80 %) and triglycerides (11.70 % and 6.44 %). The ester and triglyceride fractions were exposed to alkaline hydrolysis and the acidic components of esters (9.12 and 24.80 %) and triacylglycerols (17.43 and 26.15 %) were produced. Fractions of unsaponifiable compounds, in addition to alcohols, contained unsaponifiables with unchanged R_f values on thin-layer chromatography (TLC). Fractions of unsaponifiables were chromatographed on silica gel, and then the isolated fractions were additionally chromatographed on silica gel with silver nitrate. The isolated compounds were identified by nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopy. In the acidic component of esters, the main components are linoleic and linolenic acids. Hydrocarbons are represented by sesquiterpenes in both collections of needles. A new aromatic hydrocarbon for coniferous plants, geranyl-p-cymene, has been identified. For the first time, polyprenols were isolated from Siberian larch greens, the structure of which differs from spruce and pine polyprenols by chain length according to NMR spectroscopy and mass spectrometry data. They contain from 14 to 20 isoprene links in the chain of molecules with predominance of prenol-17. The yield of polyprenols was 12.8–14.9 % of neutral substances of yellow and green needles, respectively. Tetracyclic triterpene alcohols and sterols were isolated from green needles. Triterpene alcohols were not found in yellow needles.
For citation: Mikson D.S., Roshchin V.I. Hydrocarbons and Ethers of Extractive Substances of Siberian Larch Needles. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 170–185. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-170-185

Keywords: Larix sibirica, woody greens, needles, hydrocarbons, esters, fatty acids, geranyl-*p*-cymen, polyprenols.

Поступила 10.04.20 / Received on April 10, 2020

УДК 676.164.3.023.1:546.13
DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-186-195

МИНИМИЗАЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРА В БЕЛЕНОЙ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЕ ДЛЯ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ И УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Е.Д. Софронова, аспирант; *ResearcherID: Q-6626-2017,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1293-6597
В.А. Липин, д-р техн. наук, зав. каф.; *ResearcherID: ABH-8385-2020,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8805-8113
В.К. Дубовый, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: W-1235-2017,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2903-3872
Т.А. Суставова, ассистент; *ResearcherID: ABI-1089-2020,*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2059-2675
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095;
e-mail: alekc.ru94@mail.ru, vadim.lipin@km.ru, dubovy2004@mail.ru, sustebrother@mail.ru

Аннотация. Рост объемов химической переработки целлюлозы для производства санитарно-гигиенических и медицинских изделий, упаковки, а также наполнителей для пищевых продуктов обуславливает появление новых требований к качеству сырья. Особенно остро задача улучшения характеристик целлюлозы встала в связи с эпидемией COVID-19: спрос на одноразовые нетканые материалы, непосредственно контактирующие с кожным покровом человека, увеличился в разы. Технология отбелки сульфатной целлюлозы ECF, использующая диоксид хлора как отбеливающий реагент, доминирует в процессе производства беленой целлюлозы во всем мире. Образующиеся в результате отбелки хлорсодержащие соединения загрязняют не только сточные воды, но и сам продукт. В ближайшее время следует ожидать, что целлюлозу, изготовленную с использованием отбеливателей на основе соединений хлора, могут запретить в производстве санитарно-гигиенических изделий и упаковки для пищевых продуктов. Если продукция предприятий целлюлозно-бумажной промышленности не будет соответствовать международным требованиям, то на рынке целлюлозы возникнет дефицит сырья для указанных видов товаров. Наиболее перспективным направлением модернизации существующих схем отбелки как с точки зрения расходных показателей процесса, так и с точки зрения качества получаемой целлюлозы является использование на первой ступени кислородно-щелочной отбелки. Определение содержания общего и органически связанного хлора в целлюлозных материалах в соответствии с ISO 11480:2017 на усовершенствованной установке показало, что внедрение схем отбелки с использованием кислородно-щелочных средств позволит обеспечить рекомендуемый уровень содержания соединений хлора при сохранении необходимых характеристик целлюлозы для изготовления медицинских и санитарно-гигиенических изделий, упаковки под пищевые продукты. Однако высокое качество готовой продукции, удовлетворяющее требованиям потребителей, возможно только при условии контроля содержания хлора на всех этапах производства целлюлозы, поскольку количественные показатели концентрации данного вещества остаются близкими к верхнему допустимому пределу.

Для цитирования: Софронова Е.Д., Липин В.А., Дубовый В.К., Суставова Т.А. Минимизация содержания хлора в беленой сульфатной целлюлозе для санитарно-гигиенических изделий и упаковки пищевых продуктов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 3. С. 186–195. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-186-195

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

Ключевые слова: целлюлоза, санитарно-гигиенические изделия, пищевая упаковка, отбелка, хлорорганические соединения, нетканые материалы, делигнификация.

Введение

В современных условиях созданию материалов для санитарно-гигиенических и медицинских изделий на основе целлюлозы уделяется одно из первостепенных значений. Развитие и совершенствование данного направления стали особенно актуальны в связи с вирусными эпидемиями, в том числе пандемией COVID-19. К целлюлозному сырью для производства одноразовых нетканых материалов санитарно-гигиенического и медицинского назначения, упаковки пищевых продуктов и других подобных материалов предъявляется ряд специфических требований.

Целлюлоза, используемая в качестве сырья для санитарно-гигиенических и других медицинских изделий, должна характеризоваться высокой чистотой и молекулярной однородностью [1, 3]. Для получения беленой целлюлозы применяют гидроксид натрия, кислород, пероксид водорода, которые размягчают структуру целлюлозной клетки, способствуя выделению оставшихся нецеллюлозных компонентов.

Существует две современные технологии отбелки сульфатной целлюлозы: ECF и TCF. В технологической схеме ECF применяется диоксид хлора, который образует токсичные хлорорганические соединения. В ее модифицированном варианте – ECF-light – в качестве частичной альтернативы хлорсодержащим отбельным реагентам используются озон, пероксид водорода, кислород и др. Данная технология экономически и энергетически выгодна, позволяет достичь высокого качества отбелки, сохранить требуемые характеристики волокна и не нанести значительного урона окружающей среде за счет небольшого количества хлорорганических соединений в стоках. TCF является полностью бесхлорной технологией отбелки, исключающей использование диоксида хлора: отбелка проводится исключительно с применением озона, кислорода, пероксида водорода и других экологически безопасных реагентов. Вред окружающей среде минимизирован за счет отсутствия выбросов хлорсодержащих соединений. Однако данный вид отбелки достаточно энергоемкий. Чтобы обеспечить высокое качество целлюлозы на выходе, затрачивается большее количество воды, электричества и пара, что неэффективно и дорого [26].

Если в исходной целлюлозе содержатся органические соединения хлора, то в конечных санитарно-гигиенических и близких к ним по назначению изделиях будут присутствовать остаточные соединения хлора, которые в свою очередь могут растворяться в жидкостях организма, например в таких как пот, и проникать через кожу, нарушая работу эпидермиса и оказывая негативное влияние на здоровье человека. Похожие явления имеют место при использовании хлорсодержащей целлюлозы для упаковки пищевых продуктов. Предельная концентрация хлора в целлюлозе в регламентирующих документах четко не определена, тем не менее указывается, что по бесхлорной технологии отбелки TCF она менее 30 мг Cl^-/кг, по технологии без применения молекулярного хлора ECF – 120…200 мг Cl^-/кг. Современный потребитель отдает предпочтение беленой целлюлозе с низким содержанием соединений хлора [8, 22, 23].

Нормативные требования к сырью для производства санитарно-гигиенических и медицинских изделий в зависимости от страны различны. Так, в США качество беленой целлюлозы регулируется медицинской инструкцией FDA (Food and Drug Administration). Нормативные разработки FDA не имеют юридической силы и рассматриваются как руководство для контроля производства. По рекомендациям FDA беленую целлюлозу для санитарно-гигиенических изделий (СГИ) перед отправкой на рынок необходимо добровольно тестировать для предоставления клинических данных о рисках для здоровья в соответствии с [15]. Согласно FDA, требования для СГИ регламентируются кодами федеральной регистрации номер 21 (CFR 884.5425 и CFR 884.5435).

В Европейском союзе на СГИ распространяются менее строгие правила в отношении потребительских товаров. Однако EDANA (Европейская ассоциация производителей нетканых материалов) и глобальная организация IDNA (Ассоциация производителей нетканых материалов) уделяют значительное внимание требованиям к материалам для СГИ.

В самое ближайшее время следует ожидать, что бумажные изделия, изготовленные с применением отбеливателей на основе соединений хлора, могут запретить для упаковки пищевых продуктов и непосредственно в этих продуктах. Если сырье для производства данных видов товаров не будет соответствовать международным требованиям, то рынок целлюлозы, используемой для указанных целей, может столкнуться с трудностями. Все это ориентирует предприятия целлюлозно-бумажной промышленности к переходу на экологически безопасные технологии производства [5–7, 9, 10, 16–20, 21, 24, 27–29], минимизацию применения соединений хлора [25].

В России жесткие ограничительные нормативы по количеству хлора в целлюлозе отсутствуют, однако с учетом того, что значительная часть целлюлозы экспортируется, есть необходимость снижения и контроля содержания хлора. Существующие схемы отбелки в основном не позволяют обеспечить требуемый уровень содержания органически связанного хлора при достижении высокого качества продукта. Чтобы целлюлоза, используемая для санитарно-гигиенических, медицинских и других изделий, контактирующих с кожей человека, а также для упаковки пищевых продуктов, соответствовала стандартам, требуется переход с действующих сейчас схем отбелки на схемы ECF-light. Причем предпочтение следует отдавать вариантам модернизации с использованием ступени кислородно-щелочной отбелки (КЩО) на первом этапе. Это позволяет снизить содержание лигнина и количество применяемого диоксида хлора [2, 4].

Объекты и методы исследования

Показатели работы различных схем отбелки сульфатной хвойной целлюлозы с числом каппа 30…35 были получены в результате промышленных испытаний на действующем производстве. Белизну определяли по [11], жесткость (число каппа) – по [13], вязкость – по [12].

Концентрации общего (АОХ) и органически связанного (ОХ) хлора в целлюлозных материалах устанавливали в соответствии с [14] на усовершенствованной установке (рис. 1).

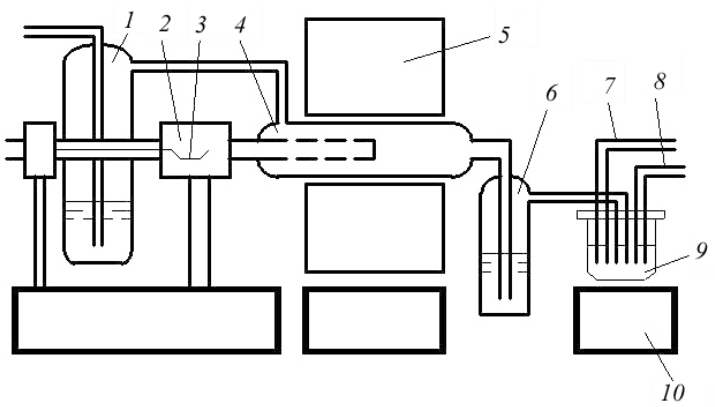


Рис. 1. Анализатор хлорорганических соединений: *1* – сосуд для отдувки (отгонки); *2* – приемник образца; *3* – образец; *4* – трубка для сжигания; *5* – печь для сжигания; *6* – абсорбер (осушитель) с серной кислотой; *7* – рабочие электроды; *8* – измерительные электроды; *9* – ячейка для титрования; *10* – перемешивающее устройство

Fig. 1. Analyzer of organochlorine compounds: *1* – vessel for stripping; *2* – sample receiver; *3* – sample; *4* – combustion tube; *5* – combustion furnace; *6* – absorber (desiccant) with sulfuric acid; *7* – working electrodes; *8* – measuring electrodes; *9* – titration cell; *10* – agitator

Результаты исследования и их обсуждение

Последовательность отбелки целлюлозы по методу ECF, отбелка с использованием трех стадий диоксида хлора и двух стадий щелочной экстракции, сокращенно записывается как Д–Щ–Д–Щ–Д. За каждой стадией следует промывка водой. Альтернативой, которая может быть реализована в результате модернизации, становится схема, предусматривающая стадию щелочно-кислородной делигнификации перед проведением химической отбелки целлюлозы. Данный процесс представляет собой взаимодействие целлюлозы с кислородом и щелочью при высоких температурах. Щелочно-кислородная делигнификация снижает количество лигнина в целлюлозе на 35–50 %.

В табл. 1 представлены сравнительные результаты работы этих двух схем, реализованных на одном оборудовании на действующем предприятии при внедрении КЩО перед отбелкой. Условия проведения КЩО: давление 0,4 МПа, температура 85 °С; расход кислорода 15 кг/т.

Таблица 1

Сравнительные результаты работы схем отбелки

Схема отбелки	Суммарный расход, кг/т			Расход O_2, кг/т	Белизна, %
	ClO_2	NaOH	H_2O_2		
$Д_0$–ЩОП/$Щ_1$П–$Д_1$–$Щ_2$П–$Д_2$	20,5	20	9	8	87,6
КЩО–$Д_0$–ЩП–$Д_1$–$Д_2$	18,0	24	4	15	87,4

Примечание: Д – обработка диоксидом хлора; ЩОП – окислительное щелочение в присутствии пероксида водорода; ЩП – щелочение в присутствии пероксида водорода.

Как видно из таблицы, переход от схемы $Д_0$–ЩОП/$Щ_1$П–$Д_1$–$Щ_2$П–$Д_2$ к схеме КЩО–$Д_0$–ЩП–$Д_1$–$Д_2$ позволяет сократить расход диоксида хлора на 2,5 кг/т (причем основная доля снижения приходится на стадию $Д_0$) и пероксида водорода на 5 кг/т при сохранении белизны практически на прежнем уровне. При этом увеличивается расход NaOH на 4 кг/т и O_2 на 7 кг/т. Однако в суммарном стоимостном выражении и с точки зрения уменьшения негативного воздействия на окружающую среду и обеспечения безопасности жизнедеятельности человека вариант с КЩО на первой стадии предпочтителен.

В промышленных условиях были также проведены сравнительные испытания одноступенчатого и двухступенчатого процесса КЩО (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительные показатели работы одно- и двухступенчатой КЩО

Количество ступеней	Параметры работы ступеней КЩО					Показатели качества целлюлозы			
	Давление кислорода, МПА	Расход O_2 на ступенях, кг/т	Расход NaOH, кг/т	Температура на ступенях, °С	Продолжительность, мин	Жесткость (число каппа)	Белизна, %	Вязкость, мПа · с	Степень делигнификации, %
1	0,8 (1) – (2)	22	15	105	60	13,8	44,0	59,5	39,0
2	0,8 (1) 0,5 (2)	7 (1) 15 (2)	15	85 (1) 105 (2)	15 (1) 60 (2)	8,1	57,4	60,0	61,8

Примечание: (1) – значение для первой ступени; (2) – для второй.

Как видно из табл. 2, двухступенчатая КЩО позволяет достигнуть более высокой степени делигнификации – 61,8 % по сравнению с 39 % для одноступенчатой КЩО. Это показывает целесообразность реализации двухступенчатой схемы.

Кроме того, выполнен анализ содержания хлора в беленой целлюлозе при различных схемах отбелки с КЩО на начальном этапе. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

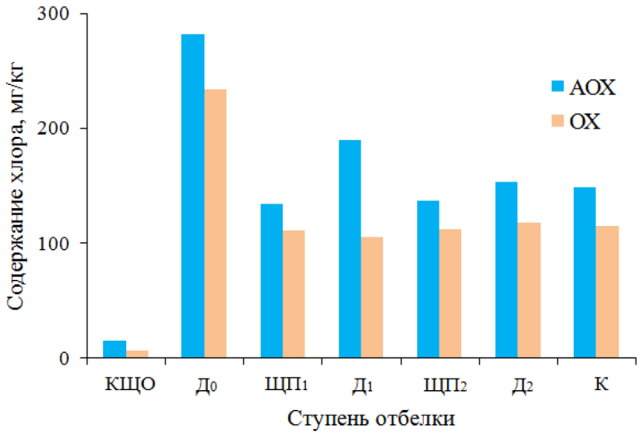
Среднее содержание АОХ и ОХ в сульфатной беленой целлюлозе для различных схем отбелки

Схема отбелки	Содержание, мг/кг	
	АОХ	ОХ
КЩО–$Д_0$–ЩОП–$Д_1$–$Щ_2$–$Д_2$–К	205	162
КЩО–$Д_0$–$ЩП_1$–$Д_1$–$ЩП_2$–$Д_2$–К	149	115
КЩО–$Д_0$–ЩО–$Д_1$–$Д_2$–К	155	120
КЩО–$Д_0$–ЩП–$Д_1$–$Д_2$–К	165	130
КЩО– ЩОП–$Д_1$–ЩП–$Д_2$–К	224	138
КЩО–$Д_0$–$ЩП_1$–$Д_1$–$ЩП_2$–$Д_2$–К	125	110
$КЩО_1$–$КЩО_2$–$Д_0$–$ЩП_1$–$Д_1$–К	166	153
$КЩО_1$–$КЩО_2$–$Д_0$–$ЩП_1$–$Д_1$–$Щ_2$–$Д_2$–К	159	147

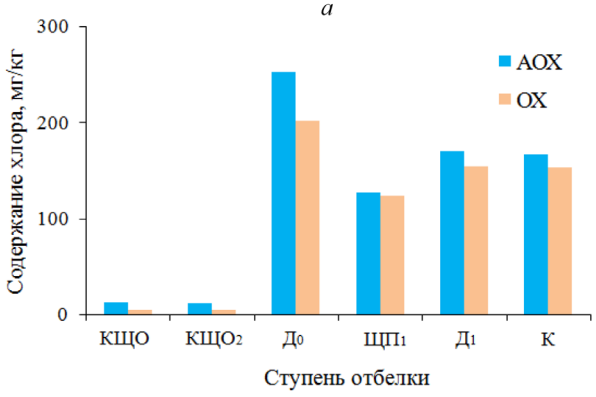
Примечание: Щ –щелочение; К – кисловка.

Из табл. 3 следует, что при наличии ступени КЩО перед отбелкой на выходе может быть получена продукция, сопоставимая по качеству с требованиями потенциальных потребителей.

На рис. 2 представлена динамика изменения содержания хлора в целлюлозе для одной из применяемых на российских предприятиях технологий отбелки (ECF). Делигнификация проводится в два этапа: КЩО (в одну или две стадии) и отбелка диоксидом хлора. Этап КЩО отличается высокой эффективностью делигнификации, что позволяет использовать небольшое количество диоксида хлора. После ступени $Д_0$ концентрация хлорорганических соединений в целлюлозной массе несколько возрастает, но в дальнейшем уровень ОХ и АОХ на протяжении всего отбеливания не превышает 250 мг/кг и в конце процесса достигает минимальных значений. Следует отметить, что увеличение числа ступеней КЩО не оказывает решающего влияния на содержание хлора в конечном продукте.



а



б

Рис. 2. Динамика изменения содержания хлора в целлюлозе для технологии ECF с одной (*а*) и двумя (*б*) предварительными ступенями кислородно-щелочной делигнификации

Fig. 2. Dynamics of changes in chlorine content in pulp for the ECF technology with one (*a*) and two pre-stages of oxygen-alkaline delignification (*б*)

Данные табл. 1–3 показывают, что по совокупности предъявляемых к целлюлозе требований КЩО является предпочтительной для российских предприятий. Высокое качество готовой продукции, удовлетворяющее требованиям потребителей, возможно только при условии постоянного контроля содержания хлора в целлюлозе, поскольку его количественные показатели остаются близкими к верхнему допустимому пределу.

Выводы

1. Переход к отбелке целлюлозы с щелочно-кислородной делигнификацией перед началом основной стадии процесса позволяет сократить расход диоксида хлора на 2,5 кг/т и пероксида водорода на 5 кг/т при сохранении белизны практически на прежнем уровне. За счет снижения количества выбросов хлорсодержащих отходов негативное воздействие на окружающую среду и безопасность жизнедеятельности человека уменьшается. Причем двухступенчатая кислородно-щелочная отбелка позволяет достигнуть более высокой степени делигнификации – 61,8 % по сравнению с 39 % для одноступенчатой кислородно-щелочной отбелки.

2. Для соответствия целлюлозы по уровню содержания органически связанного и общего хлора (низкий уровень или отсутствие данного вещества) требованиям отдельных категорий заказчиков необходимо провести модернизацию действующих технологических последовательностей путем увеличения доли кислородосодержащих белящих реагентов. Наличие между варочным и отбельным цехом ступени кислородно-щелочной отбелки является путем совершенствования существующих методов отбелки как с точки зрения основных расходных показателей, так и с точки зрения содержания хлора в целлюлозе.

3. При наличии этапа кислородно-щелочной обработки на первой ступени отбелки может быть достигнуто содержание в беленой целлюлозе общего хлора – 125 мг/кг и органически связанного – 110 мг/кг.

4. Целлюлозно-бумажным предприятиям, которые изготавливают беленую целлюлозу для санитарно-гигиенических изделий, упаковки пищевых продуктов и для дальнейшей химической переработки, необходимо систематически оценивать содержание органически связанного и общего хлора в произведенном продукте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Алексеева Е.Д.* Производство растворимой целлюлозы в СССР // Pulp and Paper Industry. 2016. № 1. С. 67–75.

Alekseeva E.D. Production of Soluble Pulp in the USSR. *Pulp and Paper Industry*, 2016, no. 1, pp. 67–75.

2. *Королева Т.А., Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Дряхлицын А.А., Медведев В.В., Мосеев В.Г.* Применение окислительного щелочения в процессе отбелки лиственной сульфатной целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 4. С. 168–177.

Koroleva T.A., Milovidova L.A., Komarova G.V., Dryakhlitsyn A.A., Medvedev V.V., Moseev V.G. The Use of Oxidative Alkali Treatment for Sulphate Hardwood Pulp Bleaching. *Lesnoy Journal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 4, pp. 168–177. DOI: https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-4-168-177

3. *Липин В.А., Софронова Е.Д., Михайловская А.П., Гребенников С.Ф., Лейман О.Ю.* Технологические особенности производства растворимой целлюлозы из лиственных пород древесины // ИВУЗ. Технология легкой промышленности. 2018. № 1. С. 110–112.

Lipin V.A., Sofronova E.D., Mikhailovskaya A.P., Grebennikov S.F., Leiman O.Yu. Technological Peculiarities of Manufacture of Soluble Cellulose from Firety Rocks of Wood. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya legkoy promyshlennosti* [The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry], 2018, no. 1, pp. 110–112.

4. *Орлова А.В., Софронова Е.Д., Липин В.А.* Отбелка целлюлозы для химической переработки по технологии ECF LIGHT // XXIII Междунар. Биос-форум и молодеж. Биос-олимпиада 2018. СПб.: Типография Любавич, 2019. С. 118–122.

Orlova A.V., Sofronova E.D., Lipin V.A. Bleaching of Pulp for Chemical Processing by ECF Light Technology. *XXIV International and Interregional Youth BIOS-Olympiad and BIOS-Forum 2018*. Saint Petersburg, Tipografiya Lyubavich, 2019, pp. 118–122.

5. *Софронова Е.Д., Липин В.А., Орлова А.В., Добош А.Ю.* Анализ содержания органического хлора в беленой целлюлозе иностранных и российских предприятий // Изв. СПбЛТА. 2020. Вып. 230. С. 215–225.

Sofronova E.D., Lipin V.A., Orlova A.V., Dobosh A.Yu. The Influence of Bleaching Scheme Technology on the Content of Total and Bound Chlorine in Cellulose. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoj Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2020, iss. 230, pp. 215–225. DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2020.230.215-225

6. Brogdon B.N., Lucia L.A. New Insights into Lignin Modification during Chlorine Dioxide Bleaching Sequences (IV): The Impact of Modifications in the (EP) and (EOP) Stages on the D_1 Stage. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2005, vol. 25, iss. 3, pp. 149–170. DOI: https://doi.org/10.1080/02773810500191716

7. Chong Y.H., Daud W.R.W., Leh C.P. Effect of Hydroxen Peroxide and Anthraquione on the Selectivity and Hexenuronic Acid Content of Mixed Tropical Hardwood Kraft Pulp during Oxygen Delignification. *BioResources*, 2003, vol. 8, no. 2, pp. 2547–2557. DOI: https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2547-2557

8. Colodette J.L., Honor Mounteer A., Gomes C.M., Rabelo M.S., Eiras K.M. *Eucalyptus Kraft Pulp Bleaching: State-of-the-Art and New Developments, 2005 Engineering, Pulping and Environmental Conference*. Atlanta, Georgia, TAPPI PRESS, 2006.

9. Fillat U., Roncero M.B., Bassa A., Sacon V.M. An Approach to Industrial Application: Influence of Black Liquor and pH on Xylanase Efficiency in Bleaching of Eucalyptus Kraft Pulp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, vol. 49, iss. 22, pp. 11200–11205. DOI: https://doi.org/10.1021/ie1014469

10. Ibarra D., Camarero S., Romero J., Martínez M.J., Martínez A.T. Integrating Laccase–Mediator Treatment into an Industrial-Type Sequence for Totally Chlorine-Free Bleaching of Eucalypt Kraft Pulp. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2006, vol. 81, iss. 7, pp. 1159–1165. DOI: https://doi.org/10.1002/jctb.1485

11. *ISO 3688:1999. Pulps – Preparation of Laboratory Sheets for the Measurement of Diffuse Blue Reflectance Factor (ISO Brightness)*. Geneva, ISO/TC 6, 1999. 5 p.

12. *ISO 5351-2:2010. Cellulose in Dilute Solutions – Determination of Limiting Viscosity Number – Part 2: Method in Iron(III) Sodium Tartrate Complex (EWNN mod NaCl) Solution*. Geneva, ISO/TC 6, 2010. 19 p.

13. *ISO 302:2015. Pulps – Determination of Kappa Number*. Geneva, ISO/TC 6, 2015. 12 p.

14. *ISO 11480:2017. Pulp, Paper and Board – Determination of Total Chlorine and Organically Bound Chlorine*. Geneva, ISO/TC 6, 2017. 16 p.

15. *ISO 10993-23:2021. Biological Evaluation of Medical Devices – Part 23: Tests for Irritation*. Geneva, ISO/TC 194, 2021. 60 p.

16. Jablonský M., Vrška M., Katuščák S. Cellulose Protectors for Improving Ozone Bleaching – Review. *Wood Research*, 2004, vol. 49, no. 4, pp. 71–86.

17. Kaur D., Bhardwaj N.K., Lohchab K.R. Effect of Incorporation of Ozone Prior to ECF Bleaching on Pulp, Paper and Effluent Quality. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 236, pp. 134–145. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.089

18. Llano T., Arce C., Ruiz G., Chenna N., Coz A. Modelling and Optimization of the Last Two Stages of an Environmentally-Compatible TCF Bleaching Sequence. *BioResources*, 2018, vol. 13, iss. 3, pp. 6642–6662. DOI: https://doi.org/10.15376/biores.13.3.6642-6662

19. Maltha C.R.A., Barbosa L.C.A., Azevedo M.A.B., Colodette J.L. Behavior of Eucalyptus Kraft Pulp Extractives Components across ECF Bleaching and Their Impact on Brightness Reversion. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2011, vol. 31, iss. 2, pp. 103–120. DOI: https://doi.org/10.1080/02773813.2010.502283

20. Nie S., Yao S., Wang S., Qin C. Absorbable Organic Halide (AOX) Reduction in Elemental Chlorine-Free (ECF) Bleaching of Bagasse Pulp from the Addition of Sodium Sulphide. *BioResources*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 713–723. DOI: https://doi.org/10.15376/biores.11.1.713-723

21. Pouyet F., Chirat C., Potthast A., Lachenal D. Formation of Carbonyl Groups on Cellulose During Ozone Treatment of Pulp: Consequences for Pulp Bleaching. *Carbohydrate Polymers*, 2014, vol. 109, pp. 85–91. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.02.082

22. Ragnar M., Ekstrom U. *Reduction of Organically Bound Chlorine Formed in Chlorine Dioxide Bleaching*. Patent US, no. US 20030056295 A1, 2003.

23. Ragnar M., Törngren A. Ways to Reduce the Amount of Organically Bound Chlorine in Bleached Pulp and the AOX Discharges from ECF Bleaching. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2002, vol. 17, no. 3, pp. 234–239. DOI: https://doi.org/10.3183/npprj-2002-17-03-p234-239

24. Ribeiro R.A., Gomes F.G.B., Floriani J.N., Damásio R.A.P., Demuner I.F., Colodette J.L. Final Chlorine Dioxide Stage at Near-Neutral pH for Bleaching Eucalyptus Pulp. *Química Nova*, 2014, vol. 37, no. 10, pp. 1646–1649. DOI: https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140251

25. Sharma N., Bhardwaj N.K., Singh R.B.P. Environmental Issues of Pulp Bleaching and Prospects of Peracetic Acid Pulp Bleaching: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 256, art. 120338. *DOI:* https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120338

26. Suess H.U. *Pulp Bleaching Today*. Berlin, Walter de Gruyter, 2010. 310 p. DOI: https://doi.org/10.1515/9783110218244

27. Valls C., Cadena E.M., Roncero M.B. Obtaining Biobleached Eucalyptus Cellulose Fibres by Using Various Enzyme Combinations. *Carbohydrate Polymers*, 2013, vol. 92, iss. 1, pp. 276–282. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.08.083

28. Yao S., Liu B., Nie S., Wang S., Qin C., Wang S. Pretreatment of Chlorine Dioxide Solution for Pulp Bleaching. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 523–531. DOI: https://doi.org/10.1166/jbmb.2019.1886

29. Zhang H., Nie S., Qin C., Zhang K., Wang S. Effect of Hot Chlorine Dioxide Delignification on AOX in Bagasse Pulp Wastewater. *Cellulose*, 2018, vol. 25, iss. 3, pp. 2037–2049. DOI: https://doi.org/10.1007/s10570-018-1670-1

MINIMIZING THE CHLORINE CONTENT IN BLEACHED SULFATE PULP FOR SANITARY TISSUE PRODUCTS AND FOOD PACKAGING

Ekaterina D. Sofronova, *Postgraduate Student; ResearcherID: Q-6626-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1293-6597*
Vadim A. Lipin, *Doctor of Engineering, Head of the Department; ResearcherID: ABH-8385-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8805-8113*
Vladimir K. Dubovy, *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: W-1235-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2903-3872*
Tatyana A. Sustavova, *Assistant; ResearcherID: ABI-1089-2020, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2059-2675*
Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; e-mail: alekc.ru94@mail.ru, vadim.lipin@km.ru, dubovy2004@mail.ru, sustebrother@mail.ru

Abstract. The increasing consumption of pulp for chemical processing, including production of sanitary tissue products and other medical products, food packaging, as well as fillers for food products leads to new requirements for the quality of raw materials. The task of improving the characteristics of pulp has become particularly acute in connection with the COVID-19 epidemic: the demand for disposable nonwoven materials in direct contact with the human skin has increased several times over. The elemental chlorine free (ECF) sulfate pulp bleaching process, which uses chlorine dioxide as a bleaching agent, dominates bleached pulp production worldwide. The chlorine-containing compounds formed as a result of bleaching pollute not only waste water, but also the product itself. In the near future, it is expected that paper products made with chlorine-based bleaches may be banned for the production of sanitary tissue products and food packaging. If the products of the pulp and paper industry do not meet international consumer requirements, the pulp market for these purposes may face undesirable results. The most promising direction of modernization the existing bleaching schemes, both in terms of the process consumption parameters and the quality of the produced pulp, is the use of oxygen-alkaline bleaching in the first stage. Determination of total and organically bound chlorine content in pulp materials in accordance with ISO 11480:2017 on the advanced plant has shown, that the introduction of bleaching schemes using oxygen-alkaline agents will ensure the recommended content of chlorine compounds while maintaining the necessary characteristics of pulp for the manufacture of medical and sanitary tissue products, food packaging. However, high quality of finished products that meet consumers' requirements is possible only if the chlorine content is controlled at all stages of pulp production, since the quantitative indicators of this substance content remain close to the upper allowable limit.
For citation: Sofronova E.D., Lipin V.A., Dubovy V.K., Sustavova T.A. Minimizing the Chlorine Content in Bleached Sulfate Pulp for Sanitary Tissue Products and Food Packaging. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 3, pp. 186–195. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-186-195

Keywords: pulp, sanitary tissue products, food packaging, bleaching, organochlorine compounds, nonwoven materials, delignification.

Поступила 19.04.20 / Received on April 19, 2020